

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**RESPUESTA DEL CRECIMIENTO DE *Pinus pseudostrobus* Lindl A LAS  
VARIABLES CLIMÁTICAS EN EL PARQUE NACIONAL CUMBRES DE  
MONTERREY**

**POR**

**JULIÁN GONZÁLEZ JUAN**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO  
DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**SEPTIEMBRE, 2019**

**RESPUESTA DEL CRECIMIENTO DE *Pinus pseudostrobus* Lindl A LAS  
VARIABLES CLIMÁTICAS EN EL PARQUE NACIONAL CUMBRES DE  
MONTERREY**

Aprobación de Tesis



**Dr. Marco Aurelio González Tagle**  
**Director**



**Dra. Wibke Himmelsbach**  
**Co-Director**



**Dr. Luis Gerardo Cuellar Rodríguez**  
**Asesor**



**Dr. Javier Jiménez Pérez**  
**Asesor**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado en la realización de mi posgrado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ciencias Forestales, que me brindaron formación académica y otorgaron los apoyos necesarios para culminar dicho estudio.

En primera estancia agradezco al Dr. Marco Aurelio González Tagle, por transmitirme su valioso conocimiento, y dedicación que me ha llevado a culminar la investigación con éxito. Gracias por su confianza, amistad y apoyo en todo momento.

A la Dra. Wibke Himmelsbach por colaborar amablemente en las revisiones tan acertadas y por sus valiosas sugerencias que sirvieron para enriquecer esta investigación. Por ser una persona amable y por contar con su entera disposición.

Al Dr. Luis Gerardo Cuellar Rodríguez le agradezco por su apreciable contribución en esta investigación.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez por ser parte del comité y aportar sus conocimientos muy importantes para la culminación.

A la M.C. Vicenta Constante García por su apoyo y enseñanza en mi estancia en el INIFAP de Gómez Palacio, Durango. Finalmente, al Dr. Julian Cerano Paredes por compartir sus conocimientos y estar siempre a la disposición de ayudar.

## **DEDICATORIA**

*A mi madre la Sra. Reyna Soledad Juan Carlos que con amor me ha brindado su apoyo y entusiasmo para llevar a cabo mis logros.*

*Para todos mis hermanos, Jonathan, Vinisa, Mar Bella y Sofía por estar siempre en mi corazón y motivarme a terminar este capítulo en mi vida.*

*A mis tías quienes forman un pilar importante en mi vida, quienes son fuente de inspiración y me brindan su amor.*

*Especialmente quiero agradecer a mi compañera y amiga Ana María Vásquez por seguir conmigo en este viaje y estar conmigo en todo momento.*

# CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
2.1. Historial de la dendrocronología .....	3
2.1. Definición de las características de los anillos .....	3
2.2. Estudios sobre reconstrucción del clima en México .....	7
<b>3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>10</b>
<b>4. OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
4.1. Objetivo general .....	11
4.2. Objetivos específicos .....	11
<b>5. HIPÓTESIS .....</b>	<b>11</b>
<b>6. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>12</b>
6.1. Localización y descripción del área de estudio .....	12
6.1.1. Vegetación y Suelo .....	13
6.1.2. Clima y Región Hidrológica .....	13
6.2. Metodología de campo .....	14
6.2.1. Obtención de la muestra .....	14
6.3. Metodología de laboratorio .....	15
6.3.1. Montado y pulido .....	15
6.3.2. Análisis de los núcleos de crecimiento .....	16
6.3.3. Medición de las series de crecimiento .....	19
6.3.4. Control de calidad mediante el programa COFECHA .....	19
6.3.5. Generación de la cronología maestra (estandarizada) .....	21
6.3.6. Criterios para la evaluación de la cronología .....	24

6.3.7. Función de respuesta clima-crecimiento .....	28
<b>7. RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
7.1. Análisis en el programa COFECHA.....	30
7.1.1. Parámetros estadísticos en COFECHA .....	32
7.2. Análisis en el programa ARSTAN.....	33
7.3. Análisis de función de respuesta .....	36
7.3.1. Correlación precipitación-crecimiento .....	36
7.3.2. Correlación temperatura-crecimiento .....	40
<b>8. DISCUSION .....</b>	<b>44</b>
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>49</b>

## Índice de Figura

<b>Figura 1.</b> Representación de una serie de crecimiento y los segmentos encontrados en la muestra de <i>Pinus pseudostrobus</i> . Podemos observar que el a) representa el segmento y b) la serie de crecimiento.....	4
<b>Figura 2.</b> Anillo total en una serie de crecimiento y el prototipo de un anillo falso en la madera de <i>Pinus pseudostrobus</i> .....	5
<b>Figura 3.</b> Representación en una serie de crecimiento la madera temprana y madera tardía en <i>Pinus pseudostrobus</i> . ....	6
<b>Figura 4.</b> Localización del área de estudio en Ciénega de González entre 1400 y 1900 msnm. Las curvas de nivel están marcadas con rosa y el polígono amarillo determina el área incendiada en 1998.....	12
<b>Figura 5.</b> Extracción de virutas en los árboles de muestreo a una altura de 0.40 m desde el suelo, evitando la madera de tensión y compresión (Tomado de Speer, 2010). Las líneas en color rojo determinan las muestras extraídas del árbol.....	15
<b>Figura 6.</b> El secado, montado y ligado de las muestras es un proceso que requiere mucho cuidado y precisión procurando poner las fibras en posición vertical para una mejor visibilidad de los anillos de crecimiento en el estereomicroscopio.....	16
<b>Figura 7.</b> Prototipo del conteo con ayuda de la lupa (a) y el control mediante la marca de dos puntos cada medio siglo (b). ....	17
<b>Figura 8.</b> Representación de la sincronización entre dos series de crecimiento de <i>P. pseudostrobus</i> . Se observa el patrón de crecimiento de 1998-2000; dos anillos estrechos (1998,1999) y un anillo grande (2000).....	18
<b>Figura 9.</b> Representación de la sincronización entre cuatro series de crecimiento de <i>P. pseudostrobus</i> , comparando los patrones en cada década de los anillos totales de 1990 al 2010.....	18
<b>Figura 10.</b> Medición del ancho de anillo total para cada serie de crecimiento, para el parque cumbres. ....	19

<b>Figura 11.</b> Las tres cronologías diferentes del índice de ancho de anillo de <i>Pinus pseudostrobus</i> . Estándar (a), Residual (b) y ARSTAN (c), tienen una extensión de 82 años (1935-2017) en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea sólida en azul corresponde a los índices anuales; la línea roja es una línea suavizada, para resaltar eventos de alta y baja frecuencia ( <i>spline</i> ); la línea negra horizontal corresponde al valor de la media 1, y la línea negra punteada constituye el número de muestras utilizadas para obtener los índices. ....	34
<b>Figura 12.</b> Correlación entre el índice de ancho de anillo de <i>Pinus pseudostrobus</i> y los registros de precipitación en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.....	37
<b>Figura 13.</b> Correlación entre el índice de ancho de anillo y los registros de precipitación estacional acumulada para la cronología Residual. Se observa una respuesta climática para el periodo enero-abril y enero-junio.....	38
<b>Figura 14.</b> Asociación entre el IAA (índice de ancho de anillo) de la cronología Residual para <i>Pinus pseudostrobus</i> y la precipitación estacional acumulada para el periodo de enero a abril en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea gris punteada muestra los periodos de precipitación. La línea negra solida muestra la variabilidad y los periodos de crecimiento de la especie.....	39
<b>Figura 15.</b> Asociación entre el IAA (índice de ancho de anillo) de la cronología Residual para <i>Pinus pseudostrobus</i> y la precipitación estacional acumulada para el periodo de enero a junio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea gris punteada muestra los periodos de precipitación. La línea negra solida muestra la variabilidad y los periodos de crecimiento de la especie.....	39
<b>Figura 16.</b> Coeficiente de correlación entre el IAA (índice de ancho de anillo total) de <i>Pinus pseudostrobus</i> y la temperatura mínima promedio por mes en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León. ....	40
<b>Figura 17.</b> Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de <i>Pinus pseudostrobus</i> y la temperatura mínima promedio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea negra muestra el índice de ancho de anillo y la línea gris punteada el periodo con mejor correlación. Podemos observar que, a menor temperatura, mayor es el crecimiento radial. ....	41



**Figura 18.** Coeficiente de correlación entre el IAA (índice de ancho de anillo total) de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura máxima promedio por mes en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León. .... 42

**Figura 19.** Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura máxima promedio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea negra muestra el IAA y la línea gris punteada el mes de enero. Podemos observar que, a mayor temperatura, menor es el crecimiento radial..... 43

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Datos de la precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León. ....	29
<b>Cuadro 2.</b> Series analizadas de <i>Pinus pseudostrobus</i> y resultados de COFECHA por periodos de 50 años y traslape de 25 años. ....	31
<b>Cuadro 3.</b> Parámetros generados para determinar la respuesta climática de <i>Pinus pseudostrobus</i> en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León. ....	32
<b>Cuadro 4.</b> Parámetros estadísticos del programa ARSTAN para la generación de las cronologías de <i>Pinus pseudostrobus</i> en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León. ....	35

## RESUMEN

Para determinar la respuesta climática de *Pinus pseudostrobus*, se analizaron 30 series de crecimiento mediante técnicas dendrocronológicas tradicionales. El objetivo fue determinar la relación descriptiva entre el índice de ancho del anillo y las variables climáticas. Los parámetros estadísticos indicadores de respuesta climática mostraron una inter-correlación entre series (0.591), sensibilidad media (0.439), auto-correlación de primer orden (0.378) y relación señal ruido (19.43). La cronología de índice de ancho de anillo y precipitación presentaron una correlación significativa ( $p < 0.05$ ) para el lapso invierno-primavera, mientras que para los meses acumulados se presentó en enero-abril y enero-junio con  $r = 0.52$  y  $r = 0.47$  respectivamente. Para la temperatura mínima se encontró una correlación significativa ( $p < 0.05$ ) en los meses de noviembre-diciembre con  $r = 0.27$ . Con respecto a la temperatura máxima, se encontró una correlación significativa en enero ( $r = 0.22$ ). La respuesta climática para la cronología residual indicó severas sequías para 1947, 1951, 1956, 1980, 1998, 1999, 2000, 2008, 2011 y periodos húmedos para 1941, 1944, 1966, 1976, 1981, 2004, 2010 y 2016. Estos resultados son similares a otras reconstrucciones realizadas en el norte de México. Los parámetros dendrocronológicos de COFECHA determinaron que la especie tiene respuesta climática. Por lo tanto, la especie sirve para ampliar la información. Sin embargo, se recomienda analizar individuos más longevos de mínimo 100 años.

**Palabras clave:** Índice de ancho de anillo, respuesta climática, series de crecimiento, correlaciones, dendrocronología.

## ABSTRACT

To determine the climatic response of *Pinus pseudostrobus*, 30 growth series were analyzed by traditional dendrochronological techniques. The objective was to determine the descriptive relationship between the ring width index and the climatic variables. The statistical parameters indicators of climate response showed an inter-correlation between series (0.591), average sensitivity (0.439), first-order self-correlation (0.378) and signal to noise ratio (19.43). The chronology of ring width and precipitation index showed a significant correlation ( $p < 0.05$ ) for the winter-spring period, while for the accumulated months it was presented in January-April and January-June with  $r = 0.52$  and  $r = 0.47$  respectively. For the minimum temperature, a significant correlation was found ( $p < 0.05$ ) in the months of November-December with  $r = 0.27$ . With respect to the maximum temperature, a significant correlation was found in January ( $r = 0.22$ ). The climatic response for the residual chronology indicated severe droughts in 1947, 1951, 1956, 1980, 1998, 1999, 2000, 2008, 2011 and humid periods in 1941, 1944, 1966, 1976, 1981, 2004, 2010 and 2016. These findings are similar to other reconstructions carried out in northern México. The dendrochronological parameters of COFECHA determined that the species had a climatic response. Therefore, *Pinus pseudostrobus* serves to broaden the dendrochronological information. Although, it is recommended to analyze long lived individuals of minimum 100 years.

**Keywords:** Ring width index, climate response, growth series, correlations, dendrochronology.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para reconstruir variaciones climáticas del pasado en diferentes partes del mundo se han empleado distintos métodos indirectos, tales como; características de capas de hielo, corales, sedimentos lacustres y marinos, análisis de polen en fósiles, formaciones geológicas y de suelo, así como el análisis de anillos de crecimiento de árboles (Bradley, 1999; Uriarte, 2003). Este último es la fuente más confiable para analizar el clima en el periodo del Holoceno (Villanueva et al. 2000). La dendrocronología es la ciencia que proviene de las palabras griegas *dendro* (árbol), *cronos* (tiempo) y *logos* (estudio). Se basa en el análisis de las secuencias de los anillos de crecimiento anuales con los eventos climáticos históricos (Stokes y Smiley, 1968).

En México, los estudios dendrocronológicos surgen ante la necesidad de entender el comportamiento de las variables climáticas y fenómenos atmosféricos (Villanueva et al. 2004). Las cronologías principalmente se han desarrollado en los géneros *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Abies* y *Taxodium*, distribuidos en las regiones norte y centro del país. Por lo que se presume que México cuenta con especies sensibles para reconstrucciones climáticas (Villanueva et al. 2015; Cerano et al. 2013).

Una de las principales problemáticas y limitantes que existen para reconstruir el clima del pasado es la incertidumbre de los datos climáticos e hidrométricos en las regiones. Por lo general, los archivos climáticos congruentes no se prologan por más de 100 años (Easterling et al. 1999). México es un país extenso, abarcando casi dos millones de kilómetros cuadrados, su orografía y la marginación de las diferentes regiones implicaría grandes inversiones económicas para la instalación de equipos de registro, así como el procesamiento de información. Situación que limita un análisis confiable del clima pasado en muchas micro-regiones del país (Díaz et al. 2016).

La especie *Pinus pseudostrobus* Lindl tiene un alto potencial económico en las regiones donde se dedican al aprovechamiento forestal, debido a que sus crecimientos son rápidos y posee una amplia distribución desde los 1,600 a 3,200 msnm (Viveros et al. 2006). Sin embargo, la especie no ha sido muy estudiada con fines de respuesta climática en el país. En la actualidad solo existe un par de referencias dendroclimáticas de esta especie; la primera en los Municipios de Áporo y Zitácuaro Michoacán (Marlés et al. 2014) y la segunda en Iturbide, Nuevo León (Constante, 2015). Por consiguiente, esta especie puede brindar una referencia para generar una respuesta climática donde se carecen de datos climáticos extensos.

Considerando lo anterior, esta investigación tiene como objetivo evaluar la respuesta climática de la especie *Pinus pseudostrobus* Lindl y determinar la relación descriptiva entre el índice de ancho de anillo y las variables climáticas en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Historial de la dendrocronología**

Los primeros sistemas de medición se realizaron en nubes, animales y plantas en la época de Teofrasto (322 a. C.) discípulo de Aristóteles (Gil y Olcina, 1997). Siglos después en la antigua Grecia y Roma Leonardo da Vinci analizó las relaciones en los anchos de los anillos y el clima. Para el siglo XVII el francés Du Hamel y el sueco Linneo observaron que los árboles caídos y en pie presentaban las mismas señales de crecimiento (Díaz, 1996).

Dos siglos después Kuechler, en EE.UU., dedujo que los cultivos anuales tenían incidencia con la sequía y precipitación. En la década de los setentas inicio una investigación y planteo si las sequías afectaban a los árboles, los anillos deberían de ser delgados (Creus, 2000).

Uno de los primeros dendrocronólogos fue Andrew E. Douglass, quien analizó en el año 1901 los anillos de un pino en Arizona EE.UU. Hecha la observación, determinó posibles relaciones con factores ambientales como la competencia, humedad, precipitación y nutrientes en el suelo. En todo caso los anillos deberían presentarse delgados o no bien diferenciados. Diez años después E. Douglass desarrolló el fechado-cruzado o conocido como “*cross-dating*”, un procedimiento que podía aplicarse en áreas donde el crecimiento de un anillo está limitado por la variabilidad interanual (Fritts, 1976).

### **2.1. Definición de las características de los anillos**

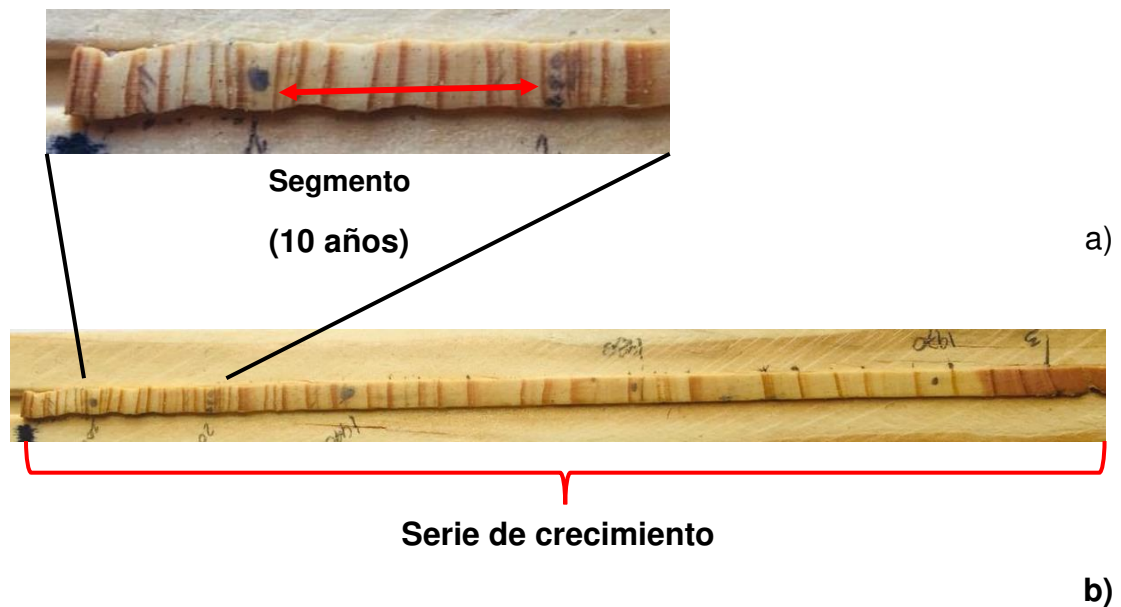
#### **Dendroclimatología**

Se refiere al estudio del clima y sus relaciones entre el crecimiento y la medición de los anillos (Fritts, 1976; Cerano et al. 2009). Esta ciencia se enfoca en conocer y analizar el cambio climático, así como sus consecuencias en los recursos

hídricos, captura de carbono y monitorear la mortalidad de especies arbóreas, extrayendo series de crecimiento (Gómez et al. 2013).

### Series de crecimiento

Se denomina serie de crecimiento a las muestras o virutas extraídas de la especie *Pinus pseudostrobus*, compuesta por segmentos representativos de cada década. Cada segmento está conformado por diez años que son representados por anillos totales (Figura 1).

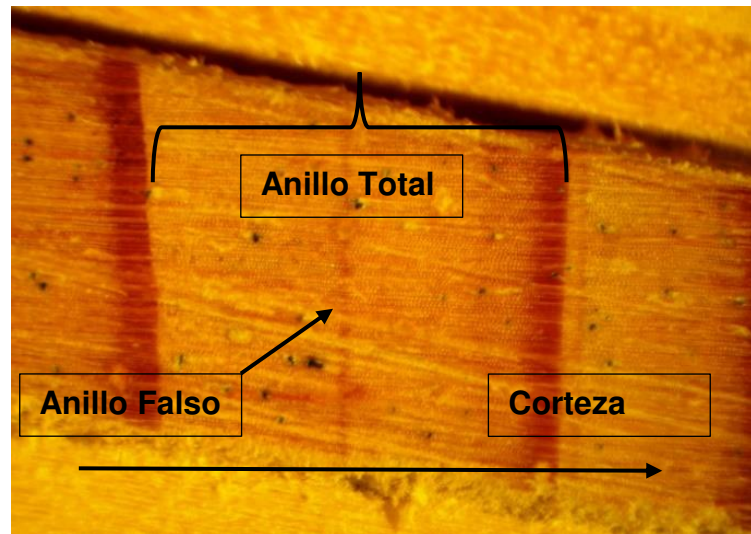


**Figura 1.** Representación de una serie de crecimiento y los segmentos encontrados en la muestra de *Pinus pseudostrobus*. Podemos observar que el a) representa el segmento y b) la serie de crecimiento.

### Anillo total

En bosques templados los anillos están bien definidos por células, que componen la madera temprana y la madera tardía (Figura 2). En el manejo forestal son de gran utilidad para saber la edad de los árboles de manera directa y de esta manera determinar los ciclos de corta (Mendoza, 1993).





**Figura 2.** Anillo total en una serie de crecimiento y el prototipo de un anillo falso en la madera de *Pinus pseudostrobus*.

### Anillo Falso

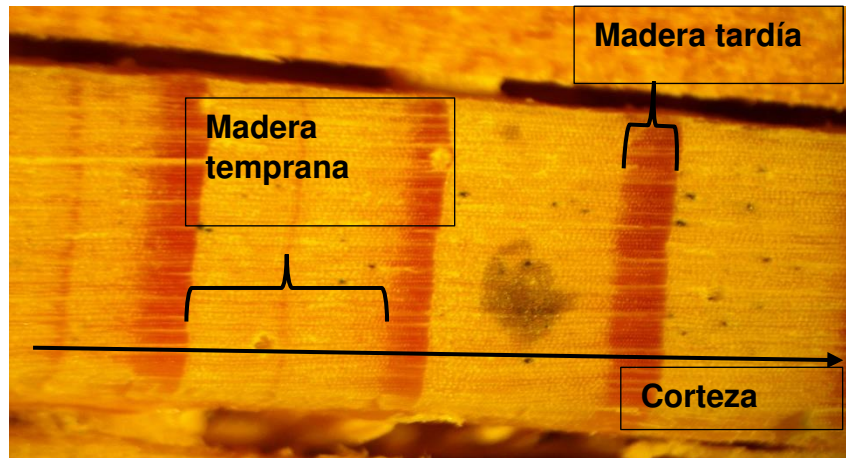
Un anillo falso es aquel que no se termina de formar, principalmente estos anillos ocurren por fuertes heladas, caída de hojas, defoliación y fluctuaciones climáticas (Giménez et al. 2005). Por lo regular se presentan en la madera temprana o de primavera.

### Madera Temprana

En las coníferas o gimnospermas la madera temprana es de coloración clara y ocurre al inicio del periodo vegetativo época en que los árboles reinician su actividad (primavera) después del periodo de dormancia. A la vez presentan paredes celulares delgadas y son más grandes (Gutiérrez, 2009). Además, su función principal es la conducción de agua, savia y nutrientes desde las raíces hasta las hojas (Giménez et al. 2005).

### **Madera Tardía**

Por el contrario, la madera tardía es más oscura y está formada por células más pequeñas de paredes celulares más gruesas (Figura 3). Su función principal es la sustentación (Giménez et al. 2005).



**Figura 3.** Representación en una serie de crecimiento la madera temprana y madera tardía en *Pinus pseudostrobus*.

## 2.2. Estudios sobre reconstrucción del clima en México

Schulman realizó en 1994 las primeras cronologías en México. Posteriormente Scott (1966) cofechó secciones en Casas Grandes, Chihuahua. Años después Naylor (1971) llevó a cabo un estudio sobre la variabilidad climática en *Abies hickeli*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus rudis* y *Pinus pseudostrobus* en Oaxaca. Del mismo modo durante las últimas décadas distintos investigadores que se mencionan a continuación han realizado cronologías en el país.

Cerano et al. (2009) realizaron una reconstrucción de la precipitación en la reserva Cerro Mohinora, Chihuahua. Generaron series dendrocronológicas de 1657 a 2005 a partir de la medición de madera temprana, madera tardía y del anillo total de la especie *Pseudotsuga menziesii*. Los resultados arrojaron que la precipitación invierno-primavera presentó gran variabilidad para la especie.

Cortés et al. (2012) obtuvieron muestras de *Pinus cembroides* en los municipios de Ocampo y San Felipe, Guanajuato, generando cronologías fundadas en el ancho de anillos. La calibración del modelo se elaboró con la precipitación de las estaciones cercanas a las áreas, encontrando una respuesta de 51 y 48%. Sin embargo, Cortés et al. (2012), determinaron que no existe una relación entre la precipitación y el fenómeno del niño (*ENSO* por sus siglas en inglés). Por lo anterior recomiendan seguir extendiendo las cronologías cerca de la región en el estado de Guanajuato.

Otro estudio parecido, y con el objetivo de analizar la respuesta climática de *Pinus cooperi* se realizó por Cerano et al. (2012). Analizaron seis sitios en diferentes grados altitudinales en el estado de Durango, con un total de 66 series por sitio. Como resultados se desarrollaron dos cronologías explicando datos climáticos como la precipitación pluvial, en la parte alta ( $r=0.73$ ), media ( $r=0.33$ ) y baja ( $r=0.70$ ). Las muestras presentaron una relación significativa con la variable precipitación para enero-junio.

Con la finalidad de recuperar información dendroclimática, Villanueva et al. (2014) analizaron 17 secciones de árboles muertos de *Taxodium mucronatum* y 20 virutas de árboles en pie en el Parque El Contador, Parque Chapultepec y Amealco, Estado de México. Como resultados encontraron que el ancho de los anillos se relaciona con la precipitación de enero a junio. Sin embargo, la correlación entre las cronologías para los tres sitios no fue significativa, dado que influyeron los riegos complementarios al arbolado y la diferencia climática entre localidades.

Años después Marlés et al. (2015) analizaron la respuesta climática en *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro, Michoacán. Como resultados encontraron que las dos especies presentaron una relación significativa con la precipitación y temperatura.

En la Sierra Madre Occidental en Durango, Pompa y Camarero (2015) hicieron un estudio para evaluar la respuesta de la madera temprana y tardía en *Pinus cooperi*. Encontraron que la madera temprana estuvo más asociada a las lluvias de invierno. Además, la madera tardía se asoció al fenómeno de Oscilación del Sur (*ENSO*).

Villanueva et al. (2015) en la Comarca Lagunera desarrollaron series de tiempo en individuos de fresno *Fraxinus udhei*. Como resultado encontraron que no se presentó ninguna relación positiva entre el índice del ancho de los anillos y la precipitación anual. Lo anterior pudo haber estado relacionado con las actividades humanas dentro del parque como construcciones (Villanueva et al. 2015).

En bosques de la Sierra Madre Oriental, Durango con *Pinus durangensis*, Díaz et al. (2016) analizaron 63 árboles, de los cuales encontraron que los índices de madera temprana estuvieron correlacionados con la precipitación de enero a agosto. Por consiguiente, el causante del 70% de la precipitación anual está influenciado por el monzón de Norteamérica.

En la región de San Dimas, Durango, Chávez et al. (2017) realizaron la reconstrucción del clima mediante muestras de anillos de crecimiento en *Pinus durangensis*, *Pinus cooperi* y *Pinus lumholtzii*. Determinaron una relación significativa entre la precipitación reconstruida (invierno-primavera) y el fenómeno de Oscilación del Sur (*ENSO*) para el periodo de tiempo de 1770 a 1978.

Villanueva et al. (2018) estudiaron la respuesta climática de *Pinus oocarpa* en Jalisco. Como resultados encontraron que la serie residual de madera temprana se correlacionó con la precipitación acumulada de octubre a mayo ( $r=0.775$ ). Las sequías detectadas fueron de 1909 al 1925 por influencia del fenómeno (*ENSO*).

### 3. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se llevó a cabo en la Sierra Madre Oriental dentro del Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM). El Área Natural Protegida, genera una producción de recursos hídricos y ecosistémicos que ayudan al desarrollo económico de una de las ciudades más pobladas y que cada vez demanda mayor cantidad de agua (Cantú, 2012).

En Nuevo León las investigaciones sobre reconstrucciones climáticas han incluido a las especies *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus hartwegii* en las zonas altas del Cerro el Potosí (Cerano et al. 2011; Villanueva et al. 2015) así como *Pinus cembroides* en zonas bajas (Constante et al. 2009). Se puede señalar que las especies antes mencionadas se encuentran en poblaciones focalizadas, a diferencia de *Pinus pseudostrobus* que posee un rango de distribución más amplio (Farjon et al. 1997).

Estudios demuestran que *P. pseudostrobus* tiene potencial dendrocronológico (Márquez y Mendizábal, 2004; Espinosa et al. 2009). Sin embargo, Arriaga y Gómez (2005) concluyeron que la especie tendrá una disminución de un 0.65%. Por tal motivo se vuelve necesario conocer la variabilidad del clima mediante sus anillos de crecimiento y su relación con eventos lluviosos (Granados, 2011). Por ejemplo, Constante et al. (2010) mencionan que estudiar las especies que generan anillos de crecimiento es importante debido a que las estaciones climáticas cubren periodos muy cortos e incongruentes. Por otra parte, Villanueva et al. (2005) mencionan que conocer el historial climático es fundamental para la planeación de los recursos hídricos de una región.

En este contexto el presente estudio aporta información de respuesta climática de la especie a la precipitación y temperatura, mediante la aplicación de técnicas dendrocronológicas. Contribuye a la ampliación de una red dendrocronológica de la especie en el país, donde el cambio climático proyecta una mayor aridez y variación en el clima (Seager et al. 2009; IPCC, 2014).

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo general

Evaluar la respuesta climática de la especie *Pinus pseudostrobus* Lindl y determinar la relación descriptiva entre el índice de ancho de anillo (IAA) y las variables climáticas en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

### 4.2. Objetivos específicos

- I. Identificar el año exacto de formación de los anillos de crecimiento de *Pinus pseudostrobus*.
- II. Generar la cronología maestra para la especie en la región.
- III. Conocer los periodos climáticos de crecimiento de la especie.
- IV. Correlacionar la precipitación mensual y acumulada con el índice ancho de anillo total.
- V. Estimar la correlación del crecimiento con la temperatura ambiental para *Pinus pseudostrobus*.

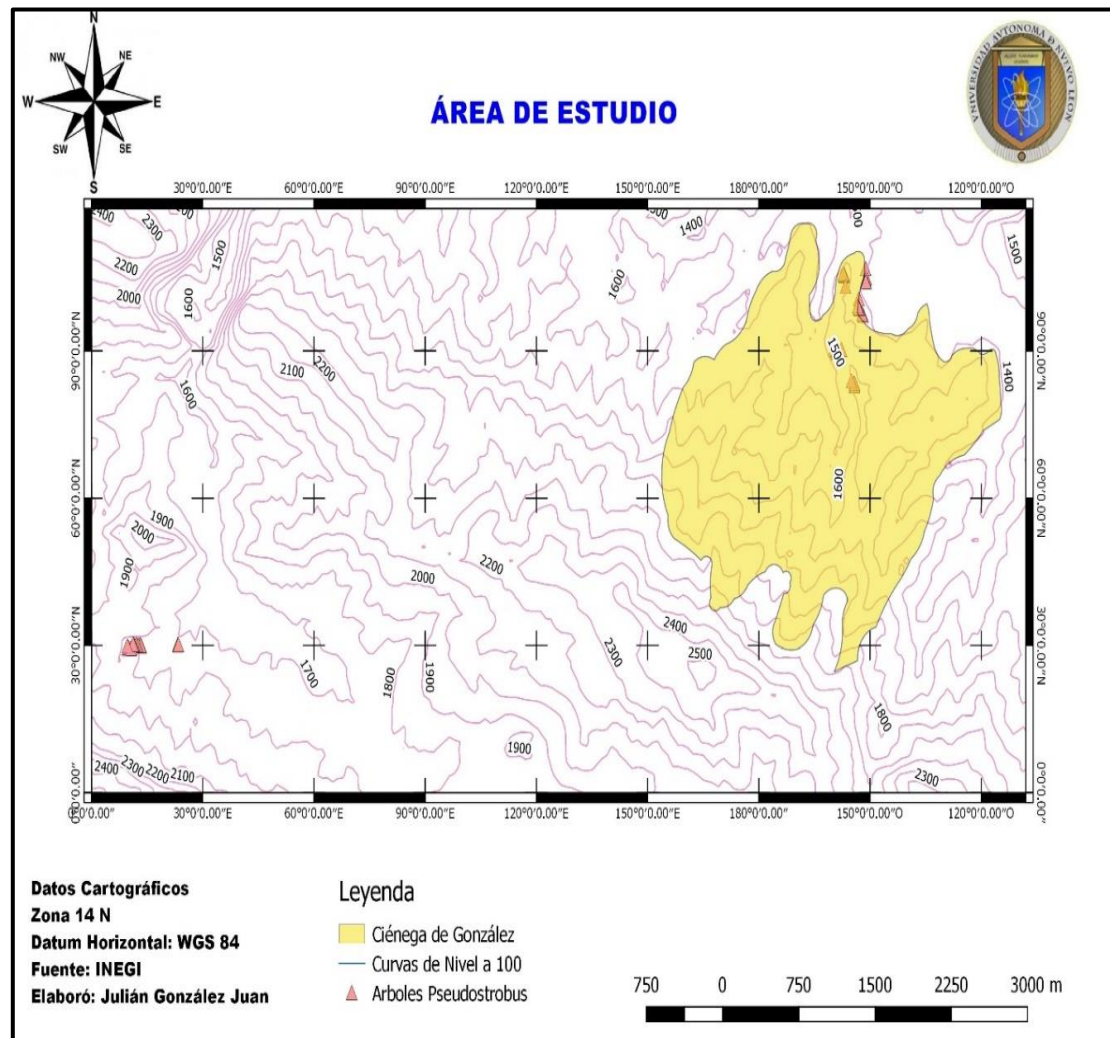
## 5. HIPÓTESIS

Los crecimientos anuales de *Pinus pseudostrobus* Lindl tienen potencial dendroclimático y están significativamente relacionados con la precipitación y temperatura de la región.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1. Localización y descripción del área de estudio

El área de estudio se localiza en el PNCM (Latitud 25°37'48"-25°03'36" N y Longitud 100°55'12"-100°06'00" W) del estado de Nuevo León (Figura 4). Abarca nueve municipios en los que destacan Monterrey, San Pedro Garza García, Rayones y Montemorelos (Seriña, 2013).



**Figura 4.** Localización del área de estudio en Ciénega de González entre 1400 y 1900 msnm. Las curvas de nivel están marcadas con rosa y el polígono amarillo determina el área incendiada en 1998.



### 6.1.1. Vegetación y Suelo

En el parque se ubican zonas áridas y semiáridas con un rango de elevación de 600 a 3400 msnm, ocupando el segundo lugar en México con mayor concentración de pinos y encinos (García, 1973; Muller, 1937; Rojas, 1965; CONANP, 2006). Algunas especies arbóreas distribuidas en el parque son *Abies* spp., *Abies vejari.*, *Arbutus* sp., *Cercis canadensis.*, *Dasyllirion* sp., *Lippia* sp., *Picea* sp., *Pinus strobiformis.*, *P. cembroides.*, *P. greggii.*, *P. hartwegii.*, *P. pinceana.*, *P. pseudostrobus.*, *P. rudis.*, *P. teocote.*, *Quercus fusiformis.*, *Q. greggii.*, *Q. hipoxlanta.*, *Q. laeta* y *Q. saltillensis.* En términos geológicos pertenece al macizo montañoso correspondiente a la Sierra Madre Oriental (SMO). El suelo predominante es semi-árido debido a una alta tasa de evapotranspiración, dominando los suelos poco profundos, de baja fertilidad y texturas gruesas. Destacando los suelos Litosoles, Regasoles, Fluviosoles, Xerosoles y Rendzimas (PNCM, 2003).

### 6.1.2. Clima y Región Hidrológica

Según García, (2004) el clima es templado subhúmedo, con lluvias en verano (C(w2)). La temperatura media anual varía entre 12 y 18 °C, mientras la evaporación media anual es de 1,846 mm. Con respecto a la precipitación media anual, fluctúa entre 600 a 700 mm (Pérez, 2013).

Los sitios se encuentran en la región hidrológica RH24, posee una superficie de 1,757 km<sup>2</sup> en la cual se forman las subcuencas del río Santa Catarina y río Ramos, quienes terminan en el río Pesquería (Pérez, 2013).

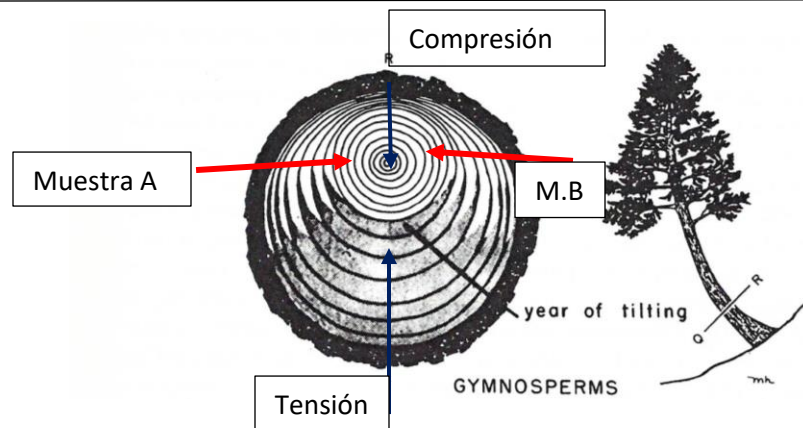
## **6.2. Metodología de campo**

### **6.2.1. Obtención de la muestra**

Se seleccionaron dos áreas de muestreos en rodales de bosques puros y mixtos de coníferas con poca intervención por aprovechamientos maderables para obtener las muestras necesarias para identificar la respuesta climática histórica de los patrones de precipitación (Chávez et al. 2017). Se ubicaron micro sitios con pendientes fuertes, suelos someros (pedregosos, de baja fertilidad) con el objetivo de maximizar la señal climática en el crecimiento (Villanueva et al. 2018).

Una vez identificados los rodales de interés, se hicieron recorridos sistemáticos en el rodal para identificar especímenes de árboles de *P. pseudostrobus* con las características deseables (Cerano et al. 2009). Por consiguiente, se seleccionaron árboles longevos con un fuste recto y ramas aplanadas debido a la muerte de los extremos superiores, corteza delgada, poda natural, libre de enfermedades y con el menor disturbio posible para el análisis dendroclimatológico (Gutiérrez y Ricker, 2019).

Se tomaron 95 virutas de 45 árboles usando taladros de Pressler de la marca Haglöf de 0.5 mm de diámetro interno. A cada individuo se le extrajeron dos o tres muestras a una altura de 0.40 metros desde el suelo evitando la compresión y tensión en las muestras de crecimiento (Figura 5). Asimismo, se registró para cada muestra la especie, las coordenadas geográficas del árbol, el diámetro normal, la posición sociológica y la altitud en la que se encontraba el árbol (Fulé et al. 2012). Una vez extraídas las muestras se guardaron en popotes de plástico para evitar que se torcieran por pérdida de humedad hasta su procedimiento en el laboratorio (Ortega et al. 2018).



**Figura 5.** Extracción de virutas en los árboles de muestreo a una altura de 0.40 m desde el suelo, evitando la madera de tensión y compresión (Tomado de Speer, 2010). Las líneas en color rojo determinan las muestras extraídas del árbol.

### 6.3. Metodología de laboratorio

#### 6.3.1. Montado y pulido

Las muestras extraídas de los árboles de *P. pseudostrobus*, se procesaron de acuerdo a técnicas estándar recomendadas por Stokes y Smiley (1968) en el Laboratorio de Dendrocronología de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL. Con la finalidad de mantener las muestras intactas fueron secadas bajo sombra y a la intemperie evitando grietas y roturas en la madera. Posteriormente fueron montadas y pegadas con cinta en molduras de madera para evitar que se torcieran durante la pérdida de humedad y se deformaran por efectos del secado (Figura 6). Finalizando con este proceso se afinaron con distintos grados de lija de 120 a 1500 para lograr una mejor visibilidad de los anillos de crecimiento (Villanueva et al. 2018).



**Figura 6.** El secado, montado y ligado de las muestras es un proceso que requiere mucho cuidado y precisión procurando poner las fibras en posición vertical para una mejor visibilidad de los anillos de crecimiento en el estereomicroscopio.

### **6.3.2. Análisis de los núcleos de crecimiento**

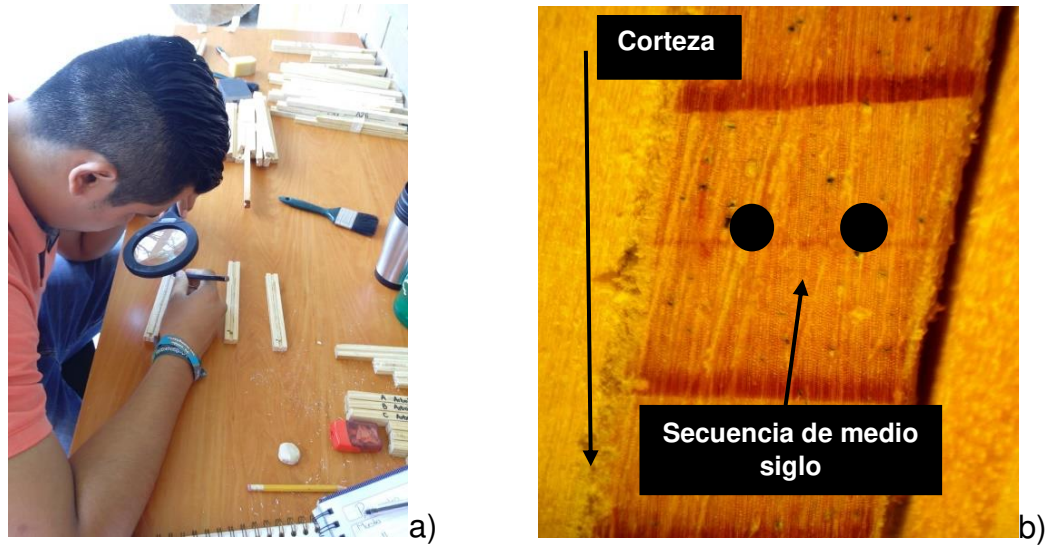
#### **Pre fechado**

La primera etapa comprende el conteo de los anillos de crecimiento (pre-fechado) para determinar el número total de los mismos y el número de años de crecimiento del árbol, mediante la aplicación de técnicas convencionales estándares (Stokes y Smiley, 1968). Para llevar un mejor control se marcó cada serie de crecimiento en cada década, medio siglo y cada siglo (Figura 7), con puntos para poder distinguir los años (Constante et al. 2009).

#### **Crossdating o Cofechado**

El procedimiento de la técnica de cofechado consta en identificar anillos o patrones de crecimiento clave en las distintas series de crecimiento. Los anillos clave (marker ring) son aquellos que son estrechos, que poseen características identificables y son consistentes entre diferentes árboles. Las Figuras 8 y 9 muestran la sincronización de dos y cuatro series de crecimiento respectivamente. La figura 8 muestra patrones en dos árboles diferentes de una secuencia de años entre de 1990 a 2010. Se puede distinguir claramente el patrón de 1998 a 2000 (dos anillos estrechos y un anillo grande). Este patrón se

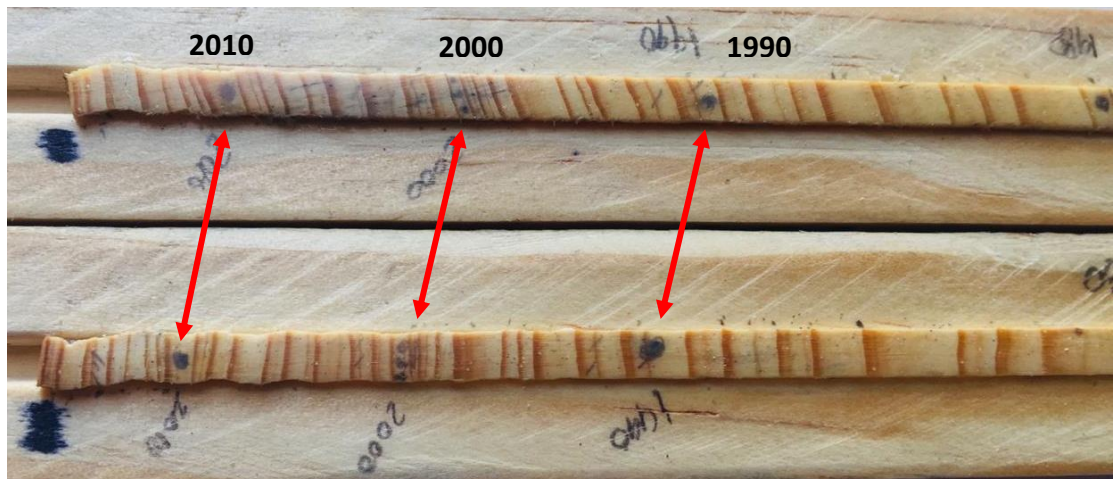
ha denominado como “Patrón Disturbio 1998” ya que involucra la temporada de sequías e incendios de 1998 (Constante et al. 2009).



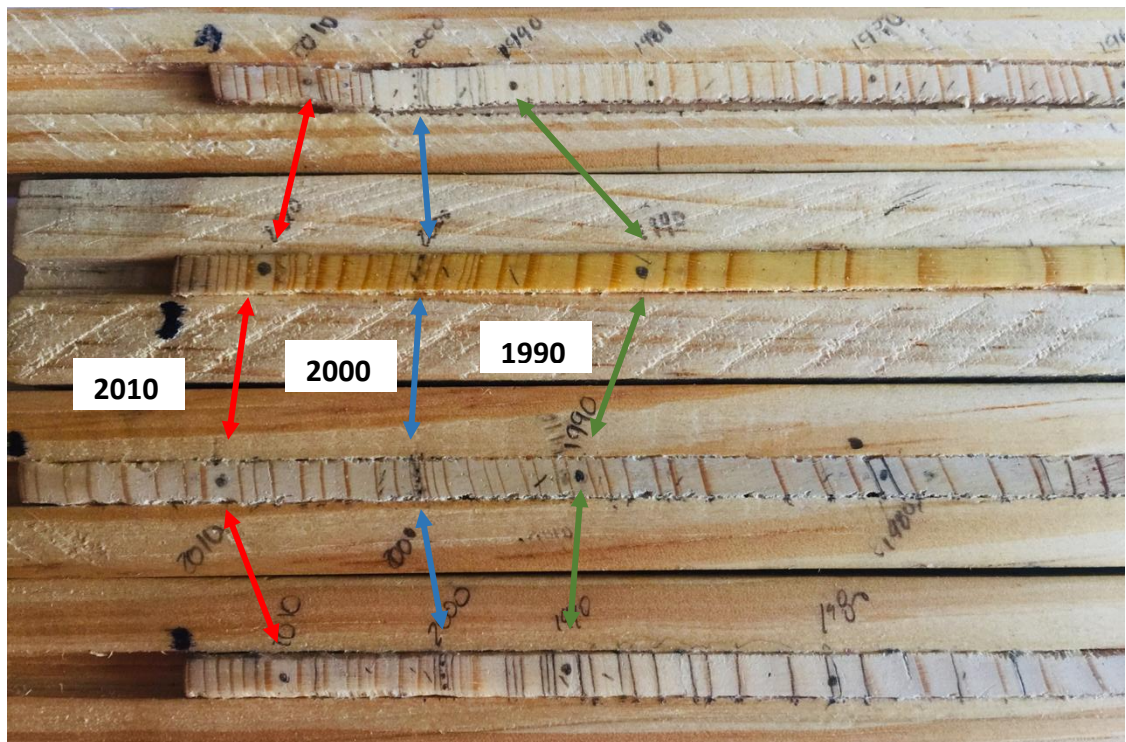
**Figura 7.** Prototipo del conteo con ayuda de la lupa (a) y el control mediante la marca de dos puntos cada medio siglo (b).

El proceso de crossdating se realiza para todas las series de crecimiento, identificando los patrones provenientes de la cronología maestra para el área de trabajo. En teoría los patrones de crecimiento deben ser igual, ya que se encuentran en las mismas condiciones climáticas regionales (Frits, 1976). Para la región de estudio se utilizó una cronología maestra generada por Sthale y colaboradores (2016), disponible en la Base de datos internacional ITRDB (<https://doi.org/10.25921/0fb2-ha85>).





**Figura 8.** Representación de la sincronización entre dos series de crecimiento de *P. pseudostrobus*. Se observa el patrón de crecimiento de 1998-2000; dos anillos estrechos (1998,1999) y un anillo grande (2000).



**Figura 9.** Representación de la sincronización entre cuatro series de crecimiento de *P. pseudostrobus*, comparando los patrones en cada década de los anillos totales de 1990 al 2010.

### 6.3.3. Medición de las series de crecimiento

Después de sincronizar las muestras de crecimiento se midió cada anillo total (Figura 10). Las mediciones se realizaron con el equipo de medición Velmex de precisión 0.0001 mm (Holmes 1983; Grissino, 2001). El equipo de medición se compone de un estereomicroscopio que se conecta con la platina deslizante y a su vez se acopla a una computadora y el software MeasureJ2X (Voortech, 2014).

Una vez determinada todas las mediciones de todas las series, se generó un archivo de salida en formato RWL (*Ring Width List*, por sus siglas en inglés).



**Figura 10.** Medición del ancho de anillo total para cada serie de crecimiento, para el parque cumbres.

### 6.3.4. Control de calidad mediante el programa COFECHA

El archivo RWL posteriormente se analizó a través del programa COFECHA misma que cuenta con una Librería (*DPL Dendrochronology Library Programs* por sus siglas en inglés, de la Universidad de Arizona). De esta manera se detecta aquellas series cuya correlación sea  $<0.3281$  ( $P < 0.001$ ) establecido por Holmes (1983) como mínima correlación. Es decir, el programa COFECHA

expone un coeficiente de correlación trasladando la muestra sobre la cronología master con 10 posiciones hacia lado izquierdo y 10 posiciones hacia el lado derecho. El objetivo es determinar si existe una mejor correlación en otro segmento en la misma serie; en tal caso el programa nos sugiere que existen anillos ausentes o falsos y nos informa de posibles problemas de medición (Gutiérrez, 2009).

La validación estadística del control de calidad se llevó a cabo determinando el grado de sincronía y el coeficiente de inter-correlación con un nivel de significancia del 99%. La realización de éste procedimiento permitió una buena calidad del fechado, finalizando con la etapa de medición.



### 6.3.5. Generación de la cronología maestra (estandarizada)

Uno de los principales requisitos para trabajar con anillos de crecimiento y datos climáticos, es la transformación o eliminación del ruido dentro de las series. Por esta razón es importante explicar las diferentes variables que influyen en el crecimiento del árbol (Constante, 2015).

Cook y Kairiukstis (1990) exponen cinco señales importantes para la determinación de los anchos de anillos de crecimiento, expresadas en la ecuación (1).

(1)

$$R_t = A_t + C_t + \& D_{1t} + \& D_{2t} + E_t.$$

Donde:

**$R_t$** = Es la serie de valores del ancho de anillo (medido) durante el año en cada árbol determinado (t);  **$A_t$** = Es cuando el crecimiento en diámetro de los árboles debido a la edad implica mayor área basal;  **$C_t$** = Son las series de residuos y representa la relación en el anillo de crecimiento y las variables climáticas ambientales, que a su vez sirven para el desarrollo del árbol;  **$D_{1t}$** = Consta de los factores de disturbios endógenos que afectan a los árboles, de tal modo que el crecimiento se ve afectado por la supervivencia o competencia entre individuos del mismo rodal;  **$D_{2t}$** = Se refiere a los factores de disturbios exógenos fuera del rodal que afectan los anillos de crecimiento tales como; insectos, defoliación, incendios forestales, exposición, vientos y contaminación atmosférica. Los deltas asociados (S) con  $D_1$  y  $D_2$  son indicadores binarios de presencia (& = 1) ó ausencia (& = 0) de disturbios en las series. Por último,  **$E_t$** = error o variabilidad no asignado a los factores antes mencionados y presentándose de manera al azar (Villanueva et al. 2010).

En el programa ARSTAN se removieron las tendencias biológicas y geométricas no relacionadas con el clima (Cook y Holmes, 1984). Este proceso generó tres cronologías 1) Estándar, 2) Residual y 3) ARSTAN.

En general el programa ajusta para cada muestra una curva exponencial negativa que mejor se adapte para eliminar los factores biológicos (Grissino, 2001). La normalización se lleva a cabo con relación al modelo exponencial ajustado que interpreta los cambios en el ancho del anillo, ecuación (2).

El modelo de una exponencial negativa (2)

$$Y_t = a e^{-bt+k}$$

Donde:

**Y<sub>t</sub>**= Se refiere al crecimiento dado para cada año (t); mientras que **a**, **b** y **k**= son coeficientes de regresión que varían de segmentos en segmentos, esto de acuerdo a los datos requeridos para ajustar, es decir a la “J” invertida en cada serie; **t**= significa el tiempo que varía de 1 a n y por último **e**= se refiere a la parte de la base de logaritmos naturales para cada serie (Villanueva et al. 2010).

De esta forma a cada serie de crecimiento se le creó un índice exponencial, que dividió el valor de ancho de anillo entre el crecimiento esperado para el año “t”.

La ecuación (3) para estandarizar fue:

(3)

$$I = W/Y$$

Donde:

**I** = Índice de crecimiento de las series estandarizadas.

**W** = Grosor del anillo medido con el micrómetro.

**Y** = Grosor de anillo obtenido con la ecuación exponencial negativa.

La estandarización permitió obtener las medias de los crecimientos de cada serie igual a 1.0 y una varianza estable, de esta forma se compararon árboles longevos y jóvenes (Cook y Holmes; 1984).

### **Procedimiento en ARSTAN**

En el programa ARSTAN se trabajó con el archivo RWL obtenido de las mediciones de crecimiento con mayor correlación entre series. Posteriormente el archivo fue convertido en formato DAT y se ajustó la curva exponencial negativa y una curva flexible (*spline*). Después en el programa FMT (*Manipulate data and or change format* por sus siglas en inglés) se extraen los datos para graficar el *spline* y las cronologías Estándar, Residual y ARSTAN que se encuentran en archivo CRN.

Una vez obtenidas las tres cronologías se procedió a determinar la de mayor ajuste, donde los parámetros evaluados se encuentran en el archivo de salida OUT.

### **6.3.6. Criterios para la evaluación de la cronología**

En este contexto se explican los parámetros dendrocronológicos que debe tener una especie para ser considerada proxy y los que se tomaron para evaluar la especie. Una especie con potencial dendrocronológico debe tener la capacidad de desarrollar anillos de crecimiento influenciados por una fuerte señal climática. Estas variaciones se reflejan a través de sus fluctuaciones en el ancho de sus anillos anuales, las características y las fórmulas son descritas por Fritts, (1976) y Grissino, (2001). La investigación se evaluó principalmente en función de los siguientes criterios.

#### **Inter-correlación entre series**

Es la relación que existe entre la influencia de la señal climática y todas las series de crecimiento de los árboles en el sitio y representa la confiabilidad de la cronología. Los valores para este parámetro oscilan entre 0.4 a 0.9 para el género *Pinus*.

#### **Problemas de crecimiento**

Se refiere a los problemas que presentan las series de crecimiento o bien en algunos casos la baja sincronía entre los anillos del mismo sitio y bajo la misma condición. Esta variable se ve directamente reflejada en la correlación entre series, de tal modo que lo ideal es seleccionar aquellas sin ningún problema.

#### **Sensibilidad**

En dendrocronología la sensibilidad es uno de los principios básicos, este parámetro estadístico calcula la diferencia entre el ancho de anillo de crecimiento y el que se aproxima. La variación está definida por las fluctuaciones interanual climáticas o variables biológicas. En México las lluvias son un factor limitante de tal modo que se nota en la variación o alta frecuencia.

El concepto de sensibilidad se refiere como la capacidad que experimentan los árboles de una región para reflejar la variabilidad climática a través de su madera temprana, madera tardía y anillo total.

Fórmula de Sensibilidad Media:

$$SM = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=m-1} \left| \frac{2(X_{t+1} + X_t)}{X_{t+1} + X_t} \right|$$

Donde:

**SM**= Sensibilidad media de las series.

**X<sub>t</sub>**= Grosor de anillos en el año t.

**X<sub>t+1</sub>**= Grosor del anillo en el año posterior a t (anillo siguiente).

**n**= Número de muestras.

La sensibilidad media varía de acuerdo a la especie y región climática; valores bajos indican ser complaciente o tienen a producir anillos similares que oscilan entre 0.15. Mientras que un valor alto son aquellas especies que suelen ser muy sensibles, este parámetro suele presentarse en 0.65.

### **Desviación estándar**

Este parámetro es la variación del crecimiento del año previo con respecto al anillo nuevo o año actual. Generalmente los valores de este parámetro oscilan entre 0.3 a 0.8. Sin embargo, es parte de la estadística y tiene poca utilidad cuando se realiza una reconstrucción climática, pero muestra la fluctuación existente entre sus crecimientos anuales.

La determinación de la desviación estándar:

$$Sx = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{t=n} (X_t + m_x)^2}$$

Donde:

**Sx**= Desviación estándar.

**X<sub>t</sub>**= Grosor de anillos en el año t.

**m<sub>x</sub>**= Promedio de las mediciones del grosor de los anillos.

**n**= Número de muestra.

### Auto-correlación de primer orden

Significa que el crecimiento de las especies arbóreas está estrechamente relacionado con la fluidez del año anterior, también denominado persistencia.

Es muy común encontrar esta definición, pero se refiere a la media del grosor de anillo “n” que es influenciado por el grosor del anillo nuevo “n-1”. Las series de anillos de árboles representan esta correlación denominada de primer orden o Lag-1. Ocurre porque el proceso fisiológico en árboles crea un Lag o retraso en respuesta a las variables climáticas. Valores altos de inter-correlación y sensibilidad media, se asocian con una baja auto-correlación.

$$R_{xy} = \frac{\sum_{t=1}^{t=n-1} (X_t + m_x)(Y_t + m_y)}{(n-1)SxSy}$$

Donde:

**R<sub>xy</sub>** = Autocorrelación media.

**X<sub>t</sub>** = Grosor de anillos en el año t.

**m<sub>x</sub>** y **m<sub>y</sub>** = Promedio del conjunto de mediciones del grosor de anillos.

**Sx** y **Sy**= Desviación estándar de las mediciones de anillos.

**n** = Número de series comparados (muestras).

Los valores más bajos de auto correlación se dan en el rango de 0.3 a 0.5, estos valores se encuentran en especies con una alta sensibilidad. Los valores más comunes oscilan entre 0.6 y 0.8, valores altos por arriba de 0.9 se encuentran por ejemplo el género *Taxodium*.

### **Proporción señal ruido**

Se denomina señal a la información de interés y ruido al resto, normalmente los árboles captan un conjunto de señales donde se puede extraer señal o ruido dependiendo de lo que se requiera encontrar. Algunos factores del ruido que interviene en la señal de variabilidad climática son: edad, dinámica del bosque, competencia, fenología, daños dentro y fuera del rodal. Para que los valores sean suficientes según a lo mencionado por Wigley et al. (1984) deben ser superiores a cinco o seis.

Villanueva y McPherson (1999), mencionan que se debe de tener en cuenta las características antes mencionadas para que la cronología sea representativa del lugar como lo son, alta sensibilidad media, alta desviación estándar, baja auto-correlación de primer orden, una alta correlación entre series y el menor problema de crecimiento.

### **6.3.7. Función de respuesta clima-crecimiento**

La función de respuesta de la especie clima-crecimiento de *P. pseudostrobus* se calculó con los datos instrumentales registrados en la estación climatológica Laguna de Sánchez cercana al sitio de muestreo entre 1947 y 2015 (68 años), correlacionando el índice de ancho de anillo con las variables climáticas. Datos de otras estaciones climatológicas (Iturbide, El Pajonal Sta. Catarina, Santiago, Allende y Montemorelos) fueron descartadas por estar incompletas (Cuadro 1).

Las variables climáticas que se consideraron fueron la precipitación mensual total en milímetros, la temperatura máxima y mínima mensual en grados centígrados (Rodríguez et al. 2014).

Los datos de precipitación y temperatura utilizados en la asociación con el índice de ancho anillo fueron obtenidos de El Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y de datos obtenidos del software Eric III (IMTA, 2000) a partir de procesos de regresión múltiple (Villanueva et al. 2018).



**Cuadro 1.** Datos de la precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.

<b>Estaciones climáticas</b>	<b>Latitud(O)</b>	<b>Longitud(N)</b>	<b>Periodos de datos</b>
Laguna de Sánchez	25,3461n	-100,2711w	1947-2015 (68 años)
Iturbide	24.733n	-99.917w	1940-2001 (61 años)
El Pajonal Sta. Catarina	25.500n	-100.033w	1954-2000 (46 años)
Santiago	25,43333n	-100.1694w	1923-1972 (50años)
Allende	25.283n	-100.033w	1961-2001 (40 años)
Montemorelos	25.189n	-99.8302w	1927-2016 (89 años)

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Análisis en el programa COFECHA

Los árboles analizados tenían una edad promedio de 82 años lo cual refleja que los árboles eran jóvenes para la especie *P. pseudostrobus*. De una población de 45 árboles muestreados y 95 series de crecimiento disponibles, solamente se fecharon 30 series (31% de las muestras totales) de las cuales se logró fechar el año exacto de su formación. Por consiguiente, el 69% de las series fue descartado debido a que presentaron problemas en el crecimiento radial, anillos falsos, ausentes y periodos de supresión. En particular, los años 1974, 1975, 1980, 1983, 1987, 1988 y 1989 son un ejemplo de anillos ausentes que registró COFECHA en esta región. La serie dendrocronológica de ancho de anillo total generada por esta investigación se extendió sobre un periodo de 82 años, de 1935 a 2017.

Los análisis que se realizaron en COFECHA dieron como resultado que las treinta series de crecimiento, fueron fechadas y medidas perfectamente ( $p < 0.01$ ) superando a la correlación mínima de  $r = 0.3281$  (Cuadro 2) establecido por Holmes (1983).

**Cuadro 2.** Series analizadas de *Pinus pseudostrobus* y resultados de COFECHA por periodos de 50 años y traslape de 25 años.

Intervalos de correlación de COFECHA						
No. de Muestra	Serie	Años		Segmentos		
				1925 1974	1950 1999	1975 2024
1	CG31AN	1967	2017		0.53	0.53
2	CG31BN	1967	2017		0.66	0.64
3	CG24AN	1956	2017		0.47	0.55
4	CG24BN	1955	2017		0.48	0.57
5	CG27BN	1966	2017		0.48	0.53
6	CG27AN	1972	2017		0.57	
7	CG30AN	1976	2017			0.61
8	CG30BN	1973	2017		0.62	
9	CG29BN	1968	2017		0.48	
10	CG29AN	1968	2017		0.57	
11	CG33AN	1967	2017		0.45	0.48
12	CG33BN	1967	2017		0.56	0.55
13	CG35AN	1959	2017		.40B	0.54
14	CG35BN	1952	2017		0.45	0.7
15	CG28AN	1982	2017		0.53	
16	CG28BN	1976	2017		0.65	
17	CG39BN	1966	2017		0.47	0.47
18	CG34AN	1956	2017		0.53	0.72
19	CG34BN	1969	2017		0.62	
20	CG02AN	1958	2017		0.65	0.68
21	CG02BN	1958	2017		0.52	0.64
22	CG19AN	1935	2017	0.72	0.69	0.68
23	CG19BN	1935	2017	0.72	0.57	0.55
24	CG02CN	1964	2017		0.58	0.64
25	CG01AN	1960	2017		0.57	0.69
26	CG01BN	1958	2017		0.59	0.7
27	CG03AN	1970	2017		0.56	
28	CG03BN	1970	2017		0.68	
29	CG26AN	1982	2017			0.58
30	CG19CN	1939	2017	0.73	0.65	0.64
Correlación total por segmentos				0.72	0.55	0.6

### 7.1.1. Parámetros estadísticos en COFECHA

De acuerdo a los análisis estadísticos realizados en COFECHA se determinó que la especie *P. pseudostrobus* tiene potencial para estimar la precipitación y temperatura del pasado en la región.

Los parámetros para evaluar la respuesta climática de *Pinus pseudostrobus* se encuentran en el Cuadro 3.

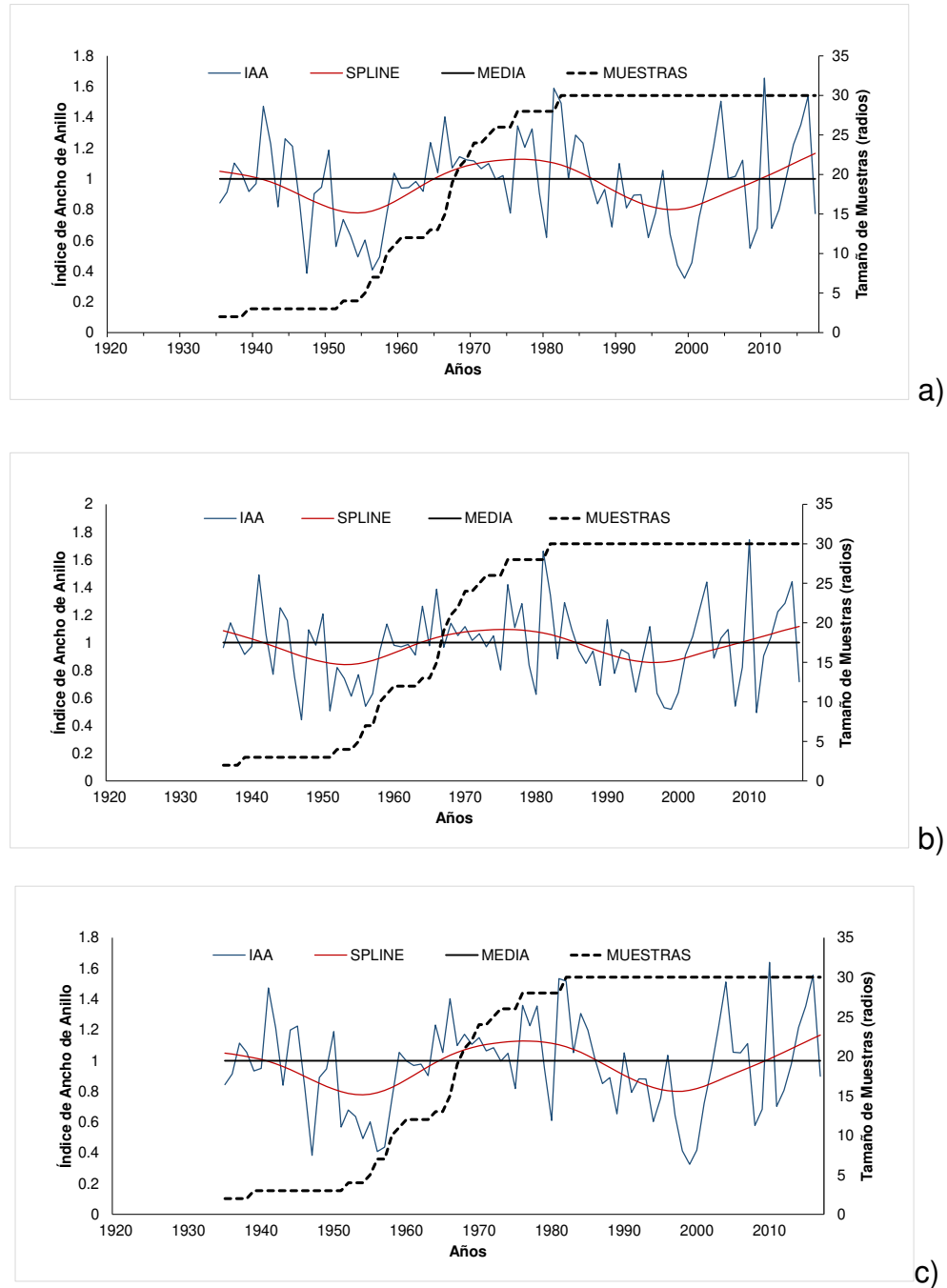
**Cuadro 3.** Parámetros generados para determinar la respuesta climática de *Pinus pseudostrobus* en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.

<b>Especie</b>	<b><i>Pinus pseudostrobus</i></b>
Estado	Nuevo León
Intercorrelación entre series	0.591
Sensibilidad Media	0.439
Desviación estándar	0.294
Auto correlación de primer orden	0.378
Relación señal ruido	19.43

## **7.2. Análisis en el programa ARSTAN**

Se generaron tres cronologías, Estándar, Residual y ARSTAN, las cuales se usaron para identificar el periodo de función de respuesta del crecimiento radial al clima (Figura 11).

Las tres cronologías mostraron tendencias en años húmedos y sequías en años específicos. Las sequías se registraron en los años 1947, 1951, 1956, 1980, 1998, 1999, 2000, 2008 y 2011. En cambio, los periodos húmedos se presentaron en los años 1941, 1944, 1966, 1976, 1981, 2004, 2010 y 2016.



**Figura 11.** Las tres cronologías diferentes del índice de ancho de anillo de *Pinus pseudostrobus*. Estándar (a), Residual (b) y ARSTAN (c), tienen una extensión de 82 años (1935-2017) en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea sólida en azul corresponde a los índices anuales; la línea roja es una línea suavizada, para resaltar eventos de alta y baja frecuencia (*spline*); la línea negra horizontal corresponde al valor de la media 1, y la línea negra punteada constituye el número de muestras utilizadas para obtener los índices.

El archivo de salida OUT generado anteriormente en el programa ARSTAN integra las series y los análisis descriptivos de cada cronología. Esta información es de gran relevancia ya que nos permite identificar la cronología que tiene el mejor ajuste basado en los datos de medición del ancho de anillo.

La cronología Residual resultó tener mejor ajuste y determinó mejor la respuesta climática de *Pinus pseudostrobus* a diferencia de las otras dos cronologías (Cuadro 4), demostrado por la media de 0.9829, la señal ruido de 19.726 y la sensibilidad media de 0.2917.

Como parte final, las cronologías en sus versiones Estándar, Residual y ARSTAN representan la importancia de realizar series de tiempo permitiendo de esta manera el análisis de fenómenos como sequías y precipitaciones a escala de tiempo mayor (Villanueva, 2010).

**Cuadro 4.** Parámetros estadísticos del programa ARSTAN para la generación de las cronologías de *Pinus pseudostrobus* en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.

Estadísticos	cronologías		
	Estándar	Residual	ARSTAN
Media	.9728	<b>.9829</b>	.9711
Desviación estándar	.2958	<b>.2762</b>	.3019
Sensibilidad Media	.2654	<b>.2917</b>	.2579
Auto correlación de primer orden	.3563	<b>.0664</b>	.4189
Auto correlación de segundo orden	-.0009	<b>-.0255</b>	-.0068
Relación señal ruido	20.258	<b>19.726</b>	-

### **7.3. Análisis de función de respuesta**

El potencial de *P. pseudostrobus* para registrar la variabilidad climática regional mediante sus anillos de crecimientos, se determinó con un análisis de función de respuesta. Se relacionaron los datos de precipitación y temperatura, ambos presentaron correlaciones altamente significativas ( $p < 0.01$ ) con la cronología Residual. Los datos climáticos registrados en la estación climatológica Laguna de Sánchez de 1947 al 2015.

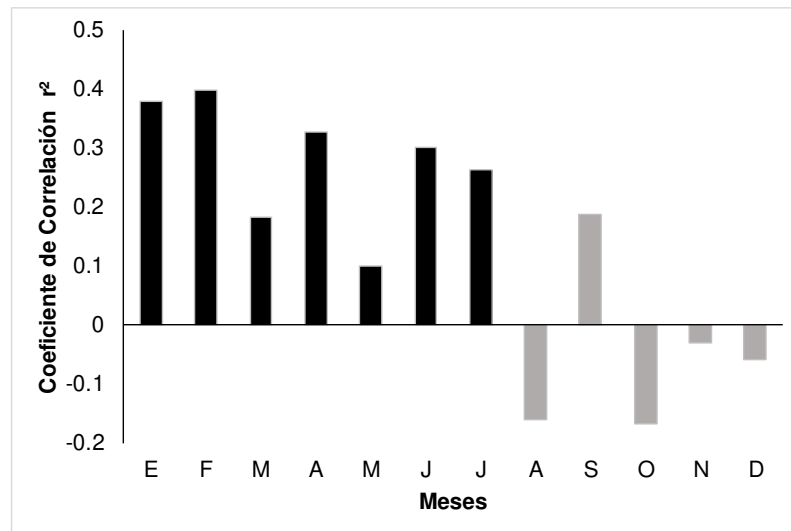
#### **7.3.1. Correlación precipitación-crecimiento**

Se realizó un análisis de correlación para determinar la relación entre la precipitación y el índice de ancho de anillo (IAA). En este caso, se correlacionó la cronología ajustada con los datos climáticos en forma secuencial con coeficientes de correlación de Pearson (Blasing et al. 1984; Fritts, 2001).

La relación del IAA y la precipitación originó una correlación de  $r = 0.52$  ( $p < 0.01$ ). Por lo que se considera que los crecimientos explicaron el 52% de la precipitación anual en la región.

Mediante la correlación de Pearson se determinó que el periodo de lluvia que más influye de manera significativa ( $p < 0.01$ ) en el crecimiento de *Pinus pseudostrobus* correspondió al lapso estacional invierno-primavera en los meses de enero a julio (Figura 12). Mientras que de agosto a diciembre las correlaciones fueron menos significativas presentándose de manera negativa a excepción de septiembre.

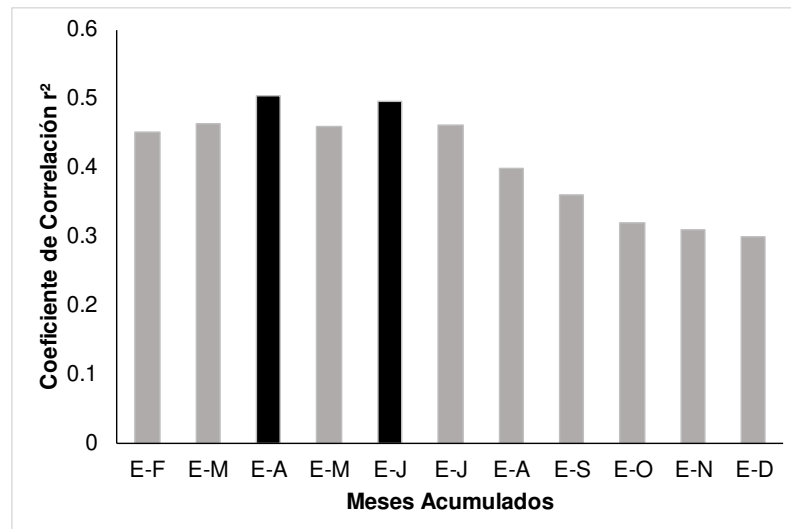




**Figura 12.** Correlación entre el índice de ancho de anillo de *Pinus pseudostrobus* y los registros de precipitación en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.

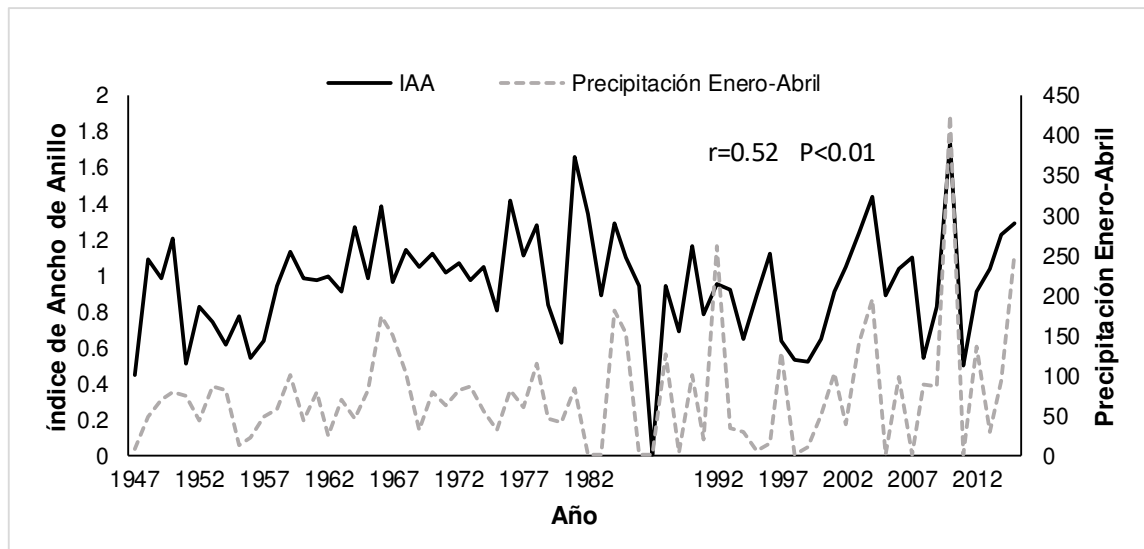
En este contexto, se realizó un análisis correlacionando el IAA con los meses acumulados (Figura 13) debido a que la correlación de los meses promedios fue significativa. Las correlaciones más altas se presentaron de enero a abril y de enero a junio ( $p < 0.01$ ). Por lo tanto, podemos asumir que la especie está influenciada por la precipitación que se manifiesta en la época fría del año.

De la misma forma se realizaron correlaciones regionales con datos de las estaciones Iturbide, El Pajonal, Sta. Catarina, Santiago, Allende y Montemorelos. Debido a que presentaron una correlación baja no se consideraron en este estudio.

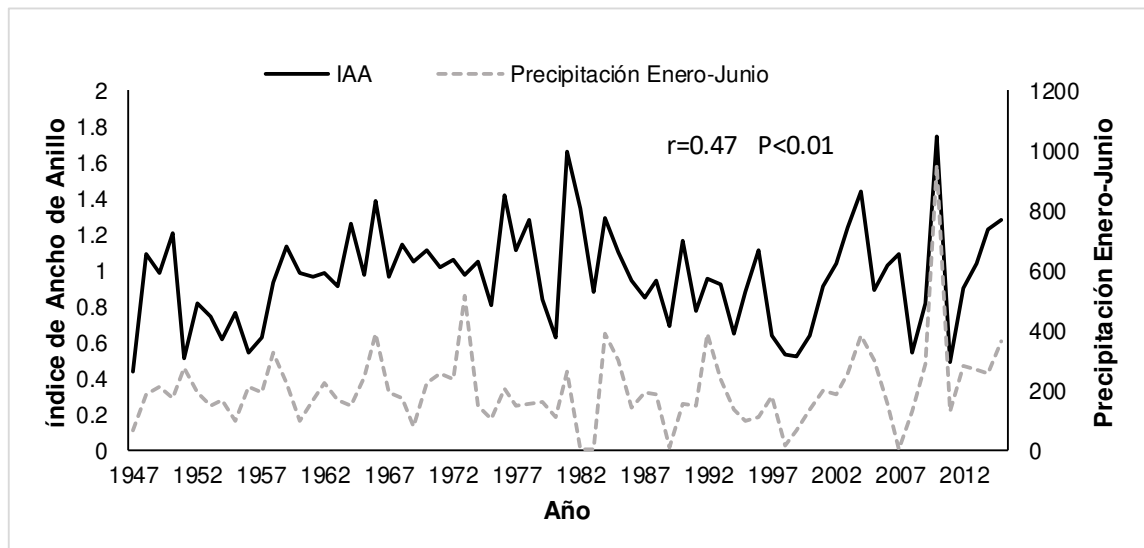


**Figura 13.** Correlación entre el índice de ancho de anillo y los registros de precipitación estacional acumulada para la cronología Residual. Se observa una respuesta climática para el periodo enero-abril y enero-junio.

Los resultados entre la cronología Residual e IAA indican que la precipitación acumulada presenta las mejores correlaciones positivas para el periodo de enero a abril con  $r=0.52$  y de enero a junio con  $r=0.47$  (Figura 14). Esto refleja y responde a la pregunta planteada en la investigación, de tal forma que la especie *P. pseudostrobus* tiene una respuesta positiva de crecimiento con la precipitación. En general, la especie es importante para analizar los diversos periodos estacionales en las regiones donde se distribuye y en las cuales se carecen de datos climáticos extensos.



**Figura 14.** Asociación entre el IAA (índice de ancho de anillo) de la cronología Residual para *Pinus pseudostrobus* y la precipitación estacional acumulada para el periodo de enero a abril en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea gris punteada muestra los periodos de precipitación. La línea negra solida muestra la variabilidad y los periodos de crecimiento de la especie.

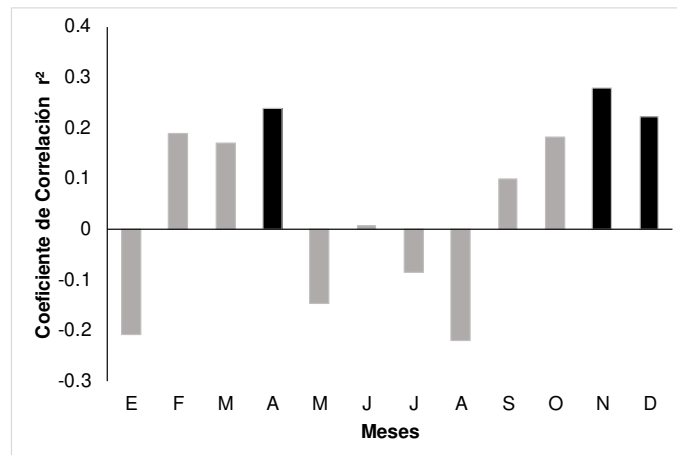


**Figura 15.** Asociación entre el IAA (índice de ancho de anillo) de la cronología Residual para *Pinus pseudostrobus* y la precipitación estacional acumulada para el periodo de enero a junio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea gris punteada muestra los periodos de precipitación. La línea negra solida muestra la variabilidad y los periodos de crecimiento de la especie.

### 7.3.2. Correlación temperatura-crecimiento

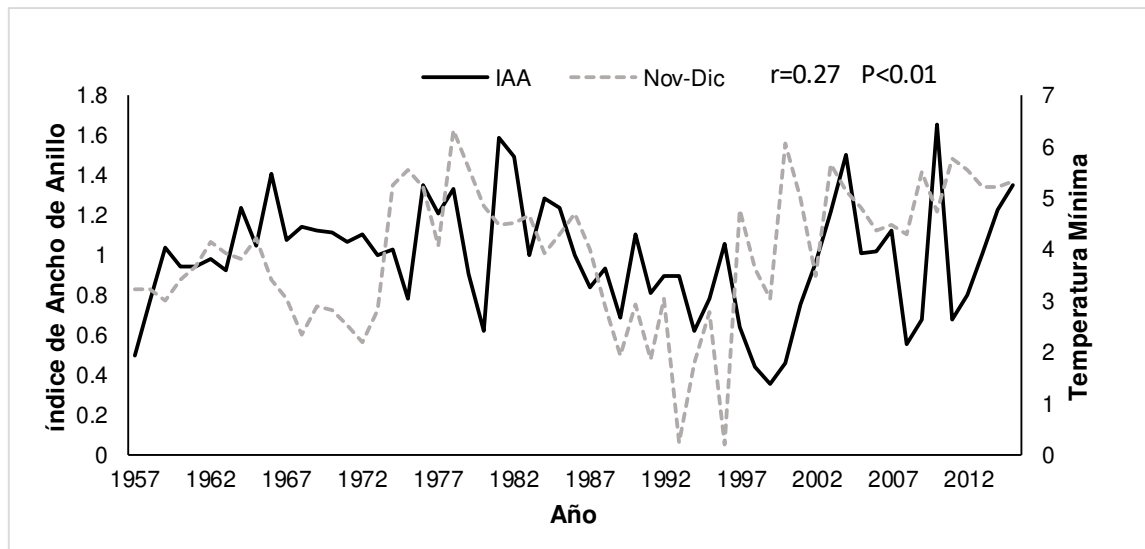
#### Temperatura mínima

En esta parte del proceso se realizó la correlación con la temperatura mínima promedio. De esta manera, se identificaron los meses abril, noviembre y diciembre (Figura 16) con correlaciones significativas ( $p < 0.01$ ). Sin embargo, los meses de noviembre y diciembre presentaron altas correlaciones. Las correlaciones fueron de  $r = 0.27$  y  $r = 0.25$  explicando un 27 y 25% de la relación que tiene la temperatura mínima con el crecimiento radial de *Pinus pseudostrobus* en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey.



**Figura 16.** Coeficiente de correlación entre el IAA (índice de ancho de anillo total) de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura mínima promedio por mes en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.

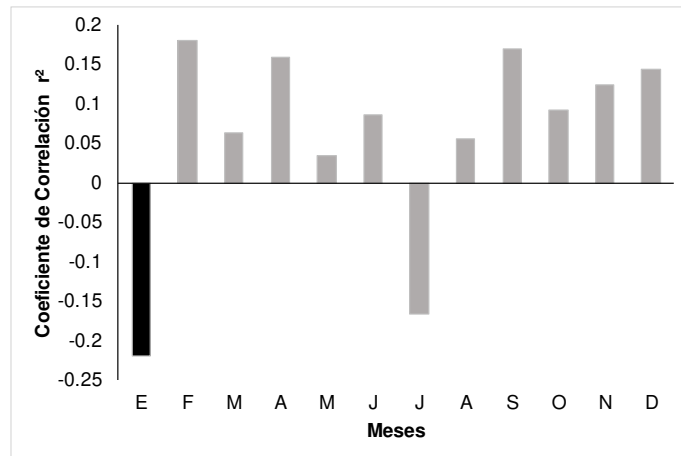
La correlación más alta y significativa ( $p < 0.01$ ) entre el IAA de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura mínima promedio se encontró en el periodo noviembre-diciembre (Figura 17).



**Figura 17.** Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura mínima promedio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea negra muestra el índice de ancho de anillo y la línea gris punteada el periodo con mejor correlación. Podemos observar que, a menor temperatura, mayor es el crecimiento radial.

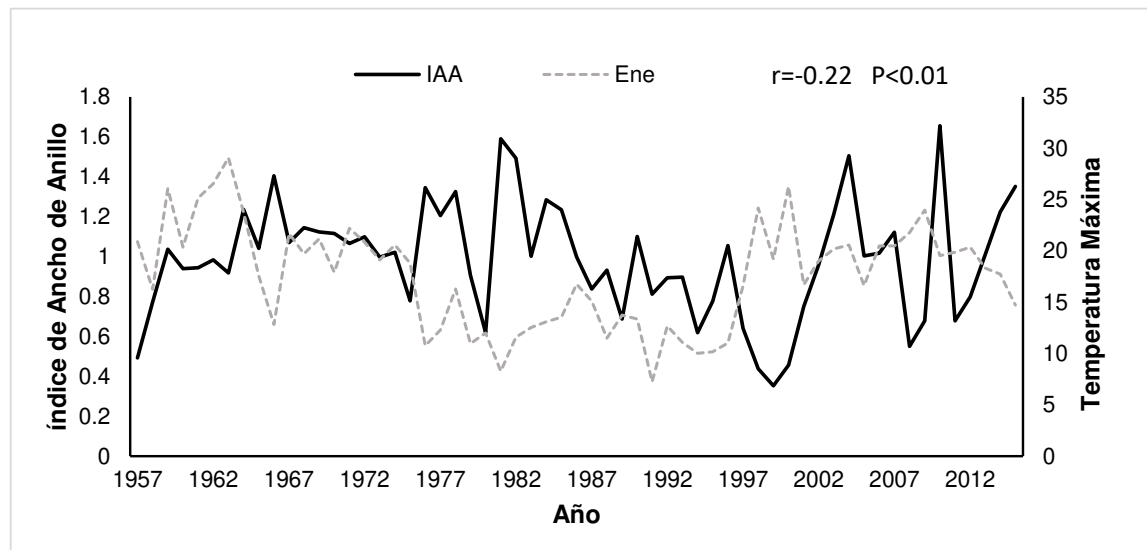
## Temperatura máxima

Con respecto a la temperatura máxima promedio se obtuvo una correlación negativa  $r=-0.22$  ( $p<0.01$ ) entre el IAA y el crecimiento radial de *P. pseudostrobus* en el mes de enero explicando el 22 % del crecimiento radial (Figura 18).



**Figura 18.** Coeficiente de correlación entre el IAA (índice de ancho de anillo total) de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura máxima promedio por mes en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León.

Por tanto, la correlación más alta se presentó de manera negativa en el mes de enero, es decir; que al aumentar la temperatura disminuye el crecimiento del IAA.



**Figura 19.** Correlación del IAA (índice de ancho de anillo) de *Pinus pseudostrobus* y la temperatura máxima promedio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. La línea negra muestra el IAA y la línea gris punteada el mes de enero. Podemos observar que, a mayor temperatura, menor es el crecimiento radial.

Sin embargo, la temperatura mínima y máxima no presenta un nivel de significancia alto, ya que explica menos del 50 % del crecimiento radial de *P. pseudostrobus*. Por lo tanto, no se descarta que puede relacionarse positivamente con los crecimientos de madera temprana y madera tardía (Constante, 2009).

## 8. DISCUSION

### Evaluación dendrocronológica de *Pinus pseudostrobus*

La evaluación de los parámetros estadísticos dendrocronológicos se llevó a cabo siguiendo los criterios descritos por Fritts, (1976) en diversas investigaciones realizadas en México (Constante et al. 2010; Villanueva et al. 2015).

La inter-correlación entre series de crecimiento obtenida fue de 0.59. Este valor se encuentra dentro del rango determinado para México que oscila entre 0.4 a 0.9 (Constante et al. 2010). En Nuevo León, Gutiérrez y Ricker (2019) obtuvieron inter-correlaciones entre series de 0.67, 0.76, 0.75 y 0.55 para las especies de *Abies vejarii*, *Pinus hartwegii*, *Pinus strobiformis* y *Pinus teocote*, respectivamente. De forma similar Villanueva et al. (2018) encontraron en *Pinus oocarpa* una inter-correlación entre series de 0.50. Estos valores demuestran que el valor obtenido en esta investigación se encuentra en un rango aceptable de correlación para el género *Pinus*.

Diversos estudios mencionan que las especies del género *Pinus* que se encuentran en México tienden a ser sensibles y oscilan entre 0.30 a 0.5 (Constante et al. 2009). La sensibilidad media encontrada en este estudio fue de 0.43. Este valor es superior a los reportados para *Pinus pseudostrobus* que varían entre 0.18 y 0.20 en Áporo y Zitácuaro, Michoacán (Marlés et al. 2014). Sin embargo, en Peña Nevada, Nuevo León, Gutiérrez y Ricker (2019) encontraron en *Pinus hartwegii* y *Pinus strobiformis* una sensibilidad media de 0.41 y 0.30, que es similar a los resultados encontrados en este estudio.

Por otra parte, la auto-correlación de primer orden obtenida en esta investigación fue de 0.37. Este valor indica que los crecimientos anuales son poco influenciados por las condiciones de crecimiento de un año anterior. Con esta misma condición, otros autores han determinado valores de 0.12 en encino (Constante, 2015). El *Taxodium mucrunatum* de 0.41 (Constante et al. 2010) y



valores entre 0.03 a 0.49 para *Pseudotsuga menziesii* (Villanueva et al. 2008). El valor obtenido en el presente estudio se encuentra debajo del mínimo común. Sin embargo, oscila entre los rangos aceptables por expertos con fines dendrocronológicos ya que presenta una sensibilidad alta (Villanueva et al. 2010).

La señal-ruido se refiere a la información en base a la cronología con otros factores no influenciados por el clima. La especie registró una señal-ruido de 19.43. El resultado obtenido es menor a lo reportado por González et al. (2017) con 22.76 en *Pinus lumholtzii*. Por otra parte, en *Pinus duranguensis* Díaz et al. (2016) encontraron una señal-ruido de 5.24. Es importante mencionar que estas diferencias encontradas en las distintas especies se deben principalmente al número de muestras analizadas y la relación con la sensibilidad.

Los resultados encontrados del presente estudio indican la sensibilidad de *Pinus pseudostrobus* a los patrones de precipitación anual en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Además, *Pinus pseudostrobus* mostró potencial para desarrollar una reconstrucción paleoclimática. Casos similares se han detectado en otros taxa de *Pinus* en México (Marlés et al. 2015, Villanueva et al. 2015, López et al. 2018).

## **Análisis de la cronología**

Se logró generar una cronología con una extensión de 82 años (1935-2017). En comparación Marlès et al. (2013) reconstruyeron para la misma especie una cronología de 62 años (1949-2010). Sin embargo, para otras especies se han generado cronologías de mayor extensión, hasta 100 años (Cerano et al. 2014; Villanueva et al. 2016; Chávez et al. 2017; Mendoza et al. 2018).

La cronología con mejor ajuste a la respuesta climática en ambas variables analizadas fue la cronología Residual. Siendo similar a lo reportado por Marlès et al. (2013) para *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana*. Sin embargo, Cortés et al. (2012) encontraron para *Pinus cembroides* que la cronología Estándar fue la que presentó mayor ajuste.

## **Función de respuesta Precipitación-crecimiento**

El crecimiento anual de *Pinus pseudostrobus* en la región responde de manera significativa ( $p < 0.001$ ) a la precipitación mensual (enero-julio). Este periodo es semejante a lo que se encontró en otros estudios llevados a cabo en el centro y noreste de México con similitud en el periodo estacional invierno-primavera (Villanueva et al. 2009; Cerano et al. 2012; Ortega et al. 2018; Gutiérrez y Ricker 2019). Algunos autores argumentan que la humedad almacenada durante el periodo de latencia (invierno) constituye una reserva importante para la siguiente estación de crecimiento (Litton et al. 2007; Chen et al. 2010). Dado a que en este periodo la precipitación se presenta de baja intensidad. Esta baja intensidad ayuda en la captación, retención y almacenamiento de agua, propiciando el crecimiento en las primeras etapas de la madera temprana (Ortega et al. 2018). Asimismo, varios autores concuerdan que las cronologías de Índice de Ancho de Anillo (IAA) procedentes del norte y noreste de México captan la señal de precipitación de manera significativa en la estación invernal (Stahle y Cleaveland, 1993).

Por su parte, Gutiérrez (2009) menciona que en algunas zonas del noreste de México el crecimiento es relativamente lento para algunas especies del género *Pinus*. Dado a que suele extender su crecimiento hasta finales de la estación de verano.

En esta investigación no se relacionó la madera temprana y madera tardía con la precipitación. Sin embargo, la estación invernal generó un impacto positivo en el crecimiento radial.

### **Función de respuesta Temperatura-crecimiento**

La especie *Pinus pseudostrobus* presentó correlación positiva entre el crecimiento radial y la temperatura mínima en los meses de noviembre y diciembre. Caso similar a lo reportado por López et al. (2018), quienes encontraron una correlación significativa en los mismos meses. Se observó que a menor temperatura hubo más crecimiento, de tal forma que los crecimientos se relacionan significativamente con la temperatura. Considerando lo anteriormente mencionado, se determinó que temperaturas mínimas promovieron mayor crecimiento. Sin embargo, temperaturas menores a cero grados provocan que se cierren los estomas y se interrumpe el crecimiento (Barceló et al. 2001). Por lo tanto, se puede explicar que la temperatura mínima en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey favoreció un mayor crecimiento en la especie durante los meses de invierno.

Por otra parte, la temperatura máxima promedio obtuvo una correlación negativa con el mes de enero. De la misma manera, González et al. (2005) encontraron para *Pseudotsuga menziesii* una correlación negativa con la temperatura máxima en Rayones, Galeana y General Zaragoza en la Sierra Madre Oriental. Sin embargo, López et al. (2018) mencionaron que a mayor temperatura menor es la disponibilidad hídrica y por consecuencia disminuye el crecimiento

## 9. CONCLUSIONES

Los parámetros estadísticos de COFECHA indicaron que la especie se encuentra dentro de los valores aceptables para fines de respuesta climática. Lo que deduce que se puede ocupar para futuras reconstrucciones con especímenes más longevos y con un número de muestras mayor.

Los resultados determinaron que la especie de *Pinus pseudostrobus* tiene una respuesta climática significativa a la precipitación acumulada. En las estaciones invierno-primavera para los periodos de enero a abril ( $r=0.52$ ) y de enero a junio ( $r=0.57$ ). Lo que implica que la precipitación tiene una influencia sobre el desarrollo en los anillos de crecimiento de *P. pseudostrobus* en el noreste de México.

La respuesta entre el índice de ancho de anillo (IAA) de *P. pseudostrobus* y la temperatura mínima señaló una respuesta significativa para noviembre-diciembre con  $r=0.27$ . Mientras que la temperatura máxima fue negativa con  $r=-0.22$  en el mes de enero. Sin embargo, ambas correlaciones fueron bajas, lo que demuestra que en el área de estudio el factor más influyente para el crecimiento radial de la especie fue la precipitación.

De esta manera, se sustenta la hipótesis planteada en la investigación, afirmando que los anillos de crecimiento de *Pinus pseudostrobus* representan una respuesta climática en la región. Por lo tanto, proporciona una alternativa para generar registros extensos en diferentes áreas del país, principalmente por que la especie tiene amplia distribución. Además, el actual estudio contribuye a la ampliación de la red de cronologías de la Sierra Madre Oriental.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Arreola, O.M.R. y Návar, C.J.D.J. (2010). Análisis de sequías y productividad con cronologías de *Pseudotsuga menziesii* Rob. & Fern., y su asociación con El Niño en el nordeste de México. *Investigaciones geográficas*, 1(71), 7-20.
- Arriaga, L. y Gómez, L. (2005). Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. *Cambio climático: una visión desde México*, 1(1), 253-263.
- Barceló, J., Nicolás, G., Sabater, B., & Sánchez, R. (2001). *Fisiología vegetal*. Madrid, España: Ediciones Pirámide.
- Bradley, R.S. (1999). Paleoclimatology. Reconstruction climates of the Quaternary. Amsterdam. *Harcourt Academic Press*. 613 p.
- Camarero, J.J., Olano, J.M., & Parras, A. (2010). Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *New Phytologist*, 185(2), 471-480.
- Cantú, C. (2012). El Parque Nacional Cumbres de Monterrey en el Contexto Mexicano de la Conservación. Primer Congreso del Parque Nacional Cumbres de Monterrey. 14 al 16 de noviembre de 2012. Monterrey, N.L., México.
- Cantú, C., González, F., Marmolejo, J. y Uvalle, J. (2010). Paisaje y Aspectos Turísticos. In Cantú, C. et al. (Ed.), *Biodiversidad y Conservación del Monumento Natural Cerro de La Silla, México*. (pp. 106-133). UANL-CONABIO-CONANP. Monterrey, N.L., México.
- Cerano, P. J., Villanueva, D., Fulé, P.Z., Brown, L.L., Constante, G.V. y Estrada, J. A. (2009). Interpretación del historial de incendios en bosques mixtos de coníferas. Gómez Palacio, Dgo. México. Folleto Técnico No. 15. INIFAP CENID RASPA. 59 p.

- Cerano, P.J., Méndez, G.J., Amaro, S.A., Villanueva, D.J., Cervantes, M.R. y Rubio, C.E.A. (2013). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera con anillos anuales de *Pinus douglasiana* en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(3), 413-423.
- Cerano, P.J., Rivera, G.M., Estrada, A.J., Trucíos, C.R. y Ríos, S.J.C. (2012). Análisis dendrocronológico de *Pinus cooperi* en Durango, México. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 12(3), 81-88.
- Cerano, P.J., Villanueva, D.J., Cervantes, M.R., Vázquez, S.L., Trucios, C.R. y Guerra, C.V. (2014). Reconstrucción de precipitación invierno-primavera para el Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán. *Investigaciones Geográficas*, 1(83), 41-54.
- Cerano, P.J., Villanueva, D.J., Fulé, P.Z., Arreola, Á.J.G., Sánchez, C.I. y Valdez, C.R.D. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua. México. *Madera y bosques*, 15(2), 27-44.
- Cerano, P.J., Villanueva, D.J., Valdez, C.R.D., Méndez, G.J. y Constante, G.V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 235-249.
- Chávez, G.M.P., Cerano, P.J., Nájera, L.J. A., Pereda, B.V., Esquivel, A.G., Cervantes, M.R., Cambrón, S.V.H., Cruz, C.F. y Corral, R.S. (2017). Reconstrucción de la precipitación invierno-primavera con base en anillos de crecimiento de árboles para la región de San Dimas, Durango, México. *Bosque (Valdivia)*. 38(2), 387-399.
- Chen, P., Welsh, C. & Hamann, A. (2010). Geographic variation in growth response of Douglas-fir to inter-annual climate variability and projected climate change. *Global Change Biology*, 16(12), 3374–3385.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (CONANP). (2006). Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

Dirección del Área Natural Protegida Cumbres de Monterrey, Nuevo león.  
179 pp.

Constante, G.V. (2015). Aplicación de técnicas dendrocronológicas en *Pinus pseudostrobus* lindl. y *Quercus canbyi* trel. para analizar la influencia climática y el cambio de uso de suelo. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, México. 135p.

Constante, G.V., Villanueva, D.J., Cerano, J. y Estrada, A.J. (2010). *Parámetros para definir el potencial dendrocronológico*. Folleto Técnico Núm. 19. Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas, y Pecuarias. 40p.

Constante, G.V., Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Cornejo, O.E.H., y Valencia, M. S. (2009). Dendrocronología de *Pinus cembroides* Zucc. y reconstrucción de precipitación estacional para el Sureste de Coahuila. *Ciencia forestal en México*, 34(106), 17-39.

Constante, G.V., Villanueva, D.J., Cerano, P.J., y Estrada, A.J. (2009). *Muestreo Dendrocronológico: colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales*. Gómez Palacio, Durango, México. Folleto Técnico No. 13. INIFAP CENID RASPA. 49 p.

Cook, E. R. y Holmes R. L. (1984). *User's manual for program ARSTAN*. University of Arizona, Tucson: Laboratory of Tree Ring Research.

Cook, E.R. (1987). *The decomposition of tree-ring series for environmental studies*. University of Arizona, Tucson: Tree-Ring Bulletin.

Cook, E.R. y Kairiustkistis, L.A. (1990). *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Correa, D.A., Gómez, G.A., Villanueva, D.J., Castruita, E.L. U., Martínez, T.T. y Cervantes, M.R. (2014). Análisis dendroclimático de ahuehuete *Taxodium mucronatum* Ten. en el centro de México. *Agrociencia*, 48(5), 537-551.

- Cortés, B. E.N., Villanueva, D.J., Nieto, P.P., Estrada, A.C., y Guerra, C.V. (2012). Reconstrucción de precipitación estacional para el noroeste de Guanajuato. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 3(9), 51-67.
- Creus, N.J. (2000). *La Reconstrucción del Clima de Época Preinstrumental*. Cantabria, España: Servicios de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- Delgado, S. C. (2000). Aplicaciones estadísticas en estudios dendrocronológicos. In Roig (Ed.), *Dendrocronología en América latina*. EDIUNC (pp: 79-102). Mendoza, Argentina.
- Díaz, J. V., Paredes, J. C., Selem, L. V., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L. L., y Corral, J. A. R. (2015). Red dendrocronológica del pino de altura *Pinus hartwegii* Lindl para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2015(86), 5-14
- Díaz, P.F. (1996). Sobre los factores claves de la interacción humanidad-biosfera. In F.D. Pineda (Ed.), *Ecología y Desarrollo* (pp. 178). Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Díaz, R.B., Villanueva, D.J. y Cerano, P.J. (2016). Reconstrucción de la precipitación estacional con anillos de crecimiento para la región hidrológica Presidio-San Pedro. *Madera y bosques*, 22(1), 111-123.
- Easterling, D. R., H. F. Diaz, A. V. Douglas, W. D. Hogg & K. E. Kunkel. (1999). Long term observations for monitoring extremes in the Americas. *Climatic Change*, 42(1), 285-308.
- Espinosa, M., J. Márquez, J. Alejandra y H. Cruz. (2009). Estudios de conos de *Pinus pseudostrobus* Lindl en un relicto de la localidad el paso, municipio de la perla, Veracruz, México, *Foresta Veracruzana*, 11(1), 33-38.



- Farjon, A. Pérez, R.J. & Styles, T.B. (1997). *Guía de campo de los pinos de México y América Central*. Royal Botanic Gardens.
- Fritts, H.C. (1976). *Tree Rings and Climate*. New York, USA: Academic Press.
- Fulé, P.Z., Yocom, L.L., Cortés, M.C., Falk, D.A., Cerano, P.J.J. & Villanueva, D. (2012). Testing a pyroclimatic hypothesis on the Mexico-United States border. *Ecology*, 93(8), 1830-1840.
- García, M.E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. (No. QC 981. G37 1973).
- García, M.E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gil, A. & Olcina, J. (1997). *Climatología general*. Barcelona, España: Editorial Ariel.
- Giménez, A. M., Moglia, J.G., Hernández, P. y Gerez, R. (2000). Anatomía de madera. Santiago del Estero Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales.
- Gómez, G.A., Silva, L.C.R., Barrera, R.M., Kis, H.B., Velázquez, M.A., Martínez, T.T., Plascencia, E.F.O. & Horwath, W.R. (2013). Growth decline and divergent tree ring isotopic composition ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) contradict predictions of  $\text{CO}_2$  stimulation in high altitudinal forests. *Global Change Biology*, 1(19), 1748-1758.
- González, E.M., González, E.M.S. y Villanueva, D.J. (2017). Evaluación del potencial dendroclimático de *Pinus lumholtzii* B.L.Rob. & Fernald. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 28-54.
- González, E.M., Jurado, E., Navar, J., González, M.S., Villanueva, J., Aguirre, O. & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir

chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213(1-3), 39-53.

Granados, R.R., Aguilar, S.G., Díaz, P.G. y Medina, B.M. (2011). Alteraciones de los indicadores agroclimáticos en años con presencia del fenómeno el niño en la región centro-occidente de México. *Revista Geográfica de América Central*, 1(2), 1-16.

Grissino, M.H.D. (2001). FHX2 Software para analizar patrones temporales y espaciales en regímenes de incendios de anillos de árboles. *Investigación de anillos de árboles*, 57(1), 115-124.

Gutiérrez, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. Arqueología Náutica Mediterránea. Generalitat de Catalunya. Editorial, Barcelona, 309-322.

Gutiérrez, G.G. y Ricker, M. (2019). Influencia del clima en el crecimiento radial en cuatro especies de coníferas en la sierra de San Antonio Peña Nevada Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90(2019), 1-14.

Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43(1), 69-75.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (IMTA). (2009). Extractor Rápido de Información Climatológica III (ERIC), Software. Jiutepec, Mor., México. s/p.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC). (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad–Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al V Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial. Ginebra, Suiza, 34 p.

Kozlowski, T.T. & Pallardy, S.G. (1997). *Growth control in woody plants*. San Diego, California, USA: Academic Press.

- Litton, C.M., Raich, J.W. & Ryan, M.G. (2007). Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 13(10), 2089- 2109.
- López, H.M.I., Cerano, P.J., Valencia, M.S., Cornejo, O.E.H., Villanueva, D.J., Cervantes, M.R. y Esquivel, A.G. (2018). Respuesta del crecimiento de *Pinus oocarpa* Schiede a variables climáticas en el noroeste de Lagunas de Montebello, Chiapas México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1-17.
- Marlès, M.J., Valor, T.I., López, B.C., Pérez, S.D.R., Maneja, Z.R., Sánchez, M.S. y Boada, M.J. (2015). Análisis dendroclimático de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana* en los municipios de Áporo y Zitácuaro (Michoacán), Reserva de la Biósfera de la Mariposa Monarca. *Investigaciones Geográficas*, 88(1), 19-32.
- Márquez, G.A.V. y Mendizábal, L.C. (2004). Variación en el tamaño de conos de *Pinus pseudostrobus* Lindl del Esquilón, municipio de Coacoatzintla, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 6(1), 33-36.
- Mendoza, B.M. (1993). Conceptos Básicos de Manejo Forestal. México, D.F: Editorial UTEHA.
- Mendoza, V.O.N., Cambrón, S.V.H., Cerano, P.J., Cervantes, M.R. y Soto, C.J.C. (2018). Reconstruction of historical precipitation (1877-2014) for the southwest of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, Querétaro, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(3), 371-386.
- Muller, C. H. (1937). Plants as indicators of climate in Northeast México. *The American Midland Naturalist*, 18(6), 986-1000.
- Ortega, A.E.J., Jiménez, P.J., Villanueva, D.J., Yamallel, Y.I.J. y Rodríguez, A.E. (2018). Reconstrucción de algunas sequías a través de anillos de crecimiento para el norte de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 439-462.

- Parque Nacional Cumbres de Monterrey. (PNCM). (2003). Programa de Conservación y Manejo (borrador). pp. 151.
- Pérez, O.J. (2013). Hidrología y Geohidrología. In Cantú-Ayala et al. (Ed.), *Historia Natural del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México* (pp. 89-98). UANL-CONANP, México.
- Pompa, G.M. y Camarero, M.J. (2015). Potencial dendroclimático de la madera temprana y tardía de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia*, 49(2), 177-187.
- Rodríguez, F.F.D.J., Pompa, G.M., Mallén, R.C. y Goche, T.R. (2014). Modelos dendroclimáticos para crecimiento radial forestal. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(26), 30-37.
- Rojas, M.P. (1965). *Generalidades sobre la vegetación del estado de Nuevo León y datos acerca de su flora*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de México, Ciudad de México.
- Santillán, H.M., Cornejo, O.E.H., Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Valencia, M.S. y Capó, A.M.Á. (2010). Potencial dendroclimático de *Pinus pinceana* Gordon en la Sierra Madre Oriental. *Madera y bosques*, 16(1), 17-30.
- Schulman, E. (1944). Dendrochronology in México, I. *Tree-Ring Bulletin* 10(3), 18-24.
- Scott, S.D. (1966). Dendrochronology in México. *Papers of the Laboratory of Tree-Ring Research*, University of Arizona Press, Tucson.
- Seager, R., Ting, M.M., Davis, M., Cane, N., Nike, N.J. & Stahle, D.K. (2009). Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmósfera*, 22(1), 1-31.
- Seriñá, G.F. (2013). La Sierra Madre Oriental y su Relación con Monterrey. In Cantú, A. et al. (Ed.), *Historia Natural del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México* (pp. 9-14). UANL-CONANP, México.

- Speer, J.H. (2010). Fundamentos de la investigación de anillos de árboles. Arizona, Tucson: Universidad de Arizona Press.
- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J.N. & Szejner, P. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149(1), 34-60.
- Stahle, D.W. & Cleaveland, M.K. (1994). Tree-ring reconstructed rainfall over the southeastern USA during the Medieval Warm Period and Little Ice Age. *In The Medieval Warm Period*, 26(1), 199-212.
- Stahle, D.W. & M.K. Cleaveland. (1993). Southern Oscillation extremes reconstructed from tree-rings of the Sierra Madre Occidental and Southern Great Plains. *Journal of Climate*, 6(1), 129-140.
- Stokes, M.A. & Smiley, T.L. (1968). *An introduction to tree-ring dating*. Arizona, EUA: The University of Press.
- Toledo, A. (2002). El agua en el tercer milenio. *Gaceta Ecológica*, 1(64), 9-18.
- Uriarte, S. (2003). Historia del clima de la tierra, Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasvo.
- Villanueva, D.J. y McPherson, G.R. (1999). Estudios dendroclimáticos en montañas del suroeste de los Estados Unidos de América y del norte de México. *Revista Ciencia Forestal en México*, 24(86), 37-61.
- Villanueva, D.J., Cerano, P.J. y Moran, M.R. (2005). Cronologías de los anillos de los árboles de Durango: Fuente de información climática y ecológica para conservación de ecosistemas en la Sierra Madre Occidental. *Órgano de Divulgación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango*, 4(6):40-41.
- Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Constante, G.V., Stahle, D., Estrada, A.J., y Tostado, P.M. (2011). Variabilidad hidroclimática histórica del norte de

México inferida con anillos de crecimiento de *Douglas-fir*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 221-234.

Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Gómez, G.A., Correa, D.A., Castruita, E.L.U., Cervantes, M.R., y Martínez, S.A.R. (2014). Cinco Siglos de Historia dendrocronológica de los ahuehuetes *Taxodium mucronatum* Ten del Parque del Contador, San Salvador Atenco, Estado de México. *Agrociencia*, 48(7), 725-737.

Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Stahle, D.W., Constante, G.V. y Estrada, A.J. (2010). *Estandarización y desarrollo de series dendrocronológicas en México. Investigadores Forestales, Agrícolas, y Pecuarias*. Gómez Palacio, Durango, México. Folleto Técnico No. 16. INIFAP CENID RASPA. 55p.

Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Stahle, D.W., Estrada, A.J. y Constante, G.V. (2008). *Potencial dendrocronológico de Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco y reconstrucciones de precipitación y flujo en México. Gómez Palacio, Durango, México. Folleto Técnico No. 23. INIFAP CENID RASPA. 49 p.

Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Stahle, D.W., Therrel, M.D., Cleaveland, M.K. y Sánchez, C.I. (2004). *Elementos Básicos de la Dendrocronología y sus Aplicaciones en México*. Gómez Palacio, Durango, México. Folleto Técnico No.2. 1(2), 1-12.

Villanueva, D.J., Cerano, P.J., Vázquez, S.L., Stahle, D.W., Fulé, P.Z., Yocom L.L., Franco, R.O. y Ruiz, C.J.A. (2015). Red dendrocronológica del pino de altura *Pinus hartwegii* Lindl para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2015(86), 5-14.

Villanueva, D.J., Fulé, P.Z., Cerano, P.J., Estrada, A.J. y Sánchez, C.I. (2009). Reconstrucción de la precipitación estacional para el barlovento de la Sierra Madre Occidental. *Ciencia Forestal en México*, 34(105), 37-69.

- Villanueva, D.J., Pérez, E.E.R., Beramendi, O.L. y Cerano, P.J. (2015). Crecimiento radial anual del fresno *Fraxinus udhei* Wenz Lingelsh en dos parques de la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 40-57.
- Villanueva, D.J., Rubio, C.E.A., Chávez, D.Á.A., Zavala, A.J.L., Cerano, P.J. y Martínez, S.A.R. (2018). Respuesta climática de *Pinus oocarpa* Schiede Ex Schetol en el Bosque La Primavera, Jalisco. *Madera y bosques*, 24(1), 1-14.
- Villanueva, D.J., Stahle, D.W., Cleaveland, M.K. y Therrell, M.D. (2000). Estado actual de la dendrocronología en México. *Revista Ciencia Forestal en México* 25(88), 5-36.
- Villanueva, J., Cerano, P.J., Stahle, D.W., Luckman, B.H., Therrell, M.D., Cleaveland, M.K. y Fulé, P.Z. (2011). La dendrocronología y reconstrucciones paleoclimáticas del norte-centro de México. Escenarios de cambio climático, registros del Cuaternario en América Latina. *Dirección General de Fomento Editorial UNAM*, México, 47-72.
- Viveros, V.H., Sáenz, R.C., Vargas, H.J.J. y López, U.J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios de Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 121-126.
- Voortech.com. (2014). MeasureJ2X measurement software. [www.voortech.com/projectj2x/docs/userGuide.htm](http://www.voortech.com/projectj2x/docs/userGuide.htm).
- Wigley, T.M.L., Briffa, K.R. & Jones, D.P. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in Dendroclimatology and Hidrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1(23), 201-103.